



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
EXTRUSOR DE PROBETAS PARA ESTUDIOS DE
CONCRETOS APTOS PARA LA IMPRESIÓN 3D**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CÉSAR IGNACIO SALAZAR IBÁÑEZ

PROFESOR GUÍA:
JAVIER LARRONDO P.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAFAEL RUIZ G.
BENJAMIN BUSTOS C.

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
Mecánico.

POR: César Ignacio Salazar Ibáñez.

FECHA: 05-03-2018

PROFESOR GUÍA: Javier Larrondo P.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO EXTRUSOR DE
PROBETAS PARA ESTUDIOS DE CONCRETOS APTOS PARA LA
IMPRESIÓN 3D**

El presente trabajo de título entrega el diseño, construcción y pruebas de un dispositivo extrusor en tres dimensiones de probetas para estudios y ensayos de concretos aptos para la impresión 3D.

Este trabajo es de carácter interdisciplinario y cuenta con el financiamiento de Ingeniería 2030 por medio de la iniciativa Beauchef Proyecta. En esta ocasión, se trabajó con un compañero de Ingeniería Civil y un compañero de Ingeniería Informática con el objetivo de abordar un problema común, considerando las tres disciplinas de manera simultánea, siendo el primer trabajo de título de este tipo. El proyecto duró un total de 9 meses, y los costos totales alcanzan los \$1.500.000.-

Para abordar este proyecto, se dividió el trabajo en 5 etapas, a saber: Ingeniería Conceptual, Memorias de Cálculo, Ingeniería de Detalle, Fabricación y Ensamblaje y Pruebas (Mecánicas y con Hormigón).

Una vez fabricado el equipo, se hace una serie de pruebas, tanto mecánicas como de electro-control y primeras impresiones en hormigón con el objetivo de encontrar desperfectos, analizando sus posibles causas y corrigiéndolas cuando era posible. Caso contrario, se dan algunos lineamientos para su solución.

Como resultado, se obtiene un prototipo de una máquina extrusora de hormigón en 3D, la cual cumple con todos los parámetros de diseño impuestos al inicio de este trabajo.

Posteriormente, se plantean algunas mejoras, como la aislación de los elementos mecánicos de desplazamiento (rieles y tornillo de potencia), pintado de la estructura metálica o mejorar en su facilidad de transporte.

Finalmente, se mencionan algunas ideas de actualización, como la incorporación del bombeo del material, o aumentar el volumen de trabajo de la impresora.

Agradecimientos

Quiero agradecer, y en un orden completamente aleatorio, a las siguientes personas que hicieron posible este trabajo:

Primeramente, a la iniciativa Beauchef Proyecta, por creer en mí y en mis compañeros, aportándonos financiamiento para este trabajo. Espero de corazón que BP y en general el DIMEC pueda seguir contribuyendo en el desarrollo de futuros proyectos interdisciplinarios.

También, quiero agradecer a mi profesor guía, don Javier Larrondo, que con sus conocimientos y paciencia (mucha paciencia) pudieron guiarme durante el desarrollo de esta memoria.

No puedo dejar pasar esta oportunidad para agradecer la enorme contribución que hizo el personal del taller mecánico del DIMEC no solo en este proyecto, sino que a lo largo de toda mi formación profesional. En “Molina” encontré un grato ambiente de trabajo y un equipo técnico de gran nivel, creativo, orientado a la solución de los problemas.

En cuarto lugar, quiero agradecer el incondicional apoyo que he encontrado en este viaje de conocimiento por parte de mis amigos. Considero mis siete años en esta facultad como un regalo de la vida, aprendí a amar, también estando acá. Recordaré siempre esas conversaciones de política, o los paseos mecánicos de cada año. Mención especial a mi mejor amigo Carlos, que creyó siempre en mí, incluso más que yo mismo.

Quiero agradecer también a mi pareja Chiara, por ser uno de los pilares fundamentales, no solo de contención emocional, sino también de inspiración. En un universo donde nosotros jugamos un papel insignificante como especie, me demostraste que la humanidad es un enorme y silencioso mineral de una infinita belleza.

También, quiero agradecer a Daniel, quien tuve el placer de conocer mientras trabajaba como ayudante en los cursos de introducción a la ingeniería. Él, con su voluntad de oro, siempre dio quietud a mis constantes peticiones de materiales o herramientas. En él no solo encontré a un excelente funcionario, también encontré a alguien con una alta calidad humana.

A mis padres, todo lo que soy no es otra cosa que el resultado de la mejor educación que pude recibir, el constante cuidado para que nunca me faltara nada, el calor de hogar, el eterno apoyo para que cada uno de nosotros siguiéramos nuestras propias rutas, hablando también por mis hermanos. Por esto y por tantísimo más, gracias.

A mi familia, mis hermanos, pero principalmente a la *yiya*, mi segunda madre, la que nos esperaba con la estufa encendida para dejar nuestros zapatos mojados a la hora de almuerzo en los lluviosos inviernos de Chillán, la que nos sabe los gustos a cada uno de nosotros, ella es la columna vertebral de mi familia, siempre ha estado presente. Por esto y por mucho más, gracias.

Sé que dejé a muchas personas en el tintero, y por ello mis más sinceras disculpas. Si fuera por mi tejería largos párrafos con muestras de agradecimiento a todos ustedes, sin embargo, el tiempo apremia yuento con vuestra comprensión.

A mi padre.
Pero aún más,
a mi madre.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Alcances	2
2	Metodología	3
2.1	Metodología de etapa de Ingeniería Conceptual.....	3
2.2	Metodología de etapa de confección de Memorias de Cálculo	4
2.3	Metodología de etapa de Ingeniería de Detalle.....	6
2.4	Metodología de etapa de fabricación y ensamblaje	7
2.5	Metodología de etapa de pruebas.....	8
3	Antecedentes	9
3.1	Impresoras 3D de Concreto.....	9
3.2	Requerimientos para el dispositivo extrusor de probetas y el extrusor	10
3.3	Rango de propiedades del Concreto.....	11
3.4	Firmware y Software.....	14
3.5	Motor Disponible.....	14
3.6	Identificación de sistemas y subsistemas.....	17
3.7	Parámetros de Diseño.....	18
4	Resultados	19
4.1	Ingeniería Conceptual	19
4.2	Memorias de Cálculo	22
4.2.1	Justificación husillo de desplazamiento en z	22
4.2.2	Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en Z.....	33
4.2.3	Justificación husillo de desplazamiento en x	35
4.2.4	Justificación de la Nuez, dirección en X.....	41
4.2.5	Estudio del Torque Rotacional	44
4.2.6	Justificación del Motor	45
4.2.7	Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en X	45
4.2.8	Justificación husillo de desplazamiento en y	48
4.2.9	Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en Y.....	58
4.2.10	Ánalysis de tensiones del subconjunto “Puente”	61

4.2.11	Pruebas en el prototipo del extrusor	67
4.3	Ingeniería de Detalle.....	70
4.3.1	Sistema de Desplazamiento	72
4.3.2	Sistema de Extrusión	77
4.4	Fabricación y Ensamblaje.....	81
4.5	Pruebas	87
4.5.1	Pruebas en el sistema de extrusión.....	87
4.5.2	Pruebas del sistema de desplazamiento	92
4.5.3	Pruebas de impresión de concreto.	94
5	Conclusiones.....	99
6	Bibliografía	104
7	Anexos.....	105
	Anexo A: Cubicación	
	Anexo B: Planos de fabricación	

1. Introducción

La aplicación de control numérico por computadora para la automatización de máquinas de herramientas ha existido desde al menos la década de los 40. Un concepto más reciente es el de las impresoras 3D de polímeros, las cuales adoptaron la forma que hoy se conoce en los años cercanos a 1984, gracias a los avances desarrollados por Chuck Hull (Escobar, 2013). Sin embargo, la aplicación de este tipo de tecnologías en la construcción con concreto no ven la luz hasta la primera mitad del 2014, de la mano de Andrey Rudenko, donde mostró al público la construcción de un castillo fabricado gracias a una impresora extrusora de concreto (Ver Figura 1-1), esta creación es considera el ejemplo clásico a la hora de citar las capacidades de construcción de este tipo de tecnologías.



Figura 1-1 Castillo construido con una impresora 3d de concreto. Fuente: (Azzarello, 2014)

En estos últimos tres años, existen muchos prototipos de impresoras 3D extrusoras de concreto alrededor del globo y la tendencia actual es a conquistar el mercado de la construcción, al menos a una escala domiciliaria gracias a los beneficios que tiene al largo plazo: poca mano de obra, bajas emisiones de contaminación (escombros, ruido, etc.), rapidez y precisión. Chile no se ha quedado atrás en esta materia y cuenta con una impresora 2d de concreto, la cual fabrica dentro de un taller paredes modulares, para ser ensamblados posteriormente en un lugar determinado.

1.1 Motivación

Una de las barreras que impide la entrada definitiva de este tipo de tecnologías al país es su exigente normativa antisísmica que se le pide cumplir al hormigón en cuestión. En consecuencia, este proyecto interdisciplinario pretende entregar a la facultad un dispositivo extrusor de probetas para el ensayo de un rango de concretos, bajo condiciones controladas, que permita generar probetas y pruebas de extrusión, y de esta manera, determinar un concreto idóneo para su implementación en la construcción según las normativas nacionales vigentes.

Para ello, se construirá, en coordinación con un compañero de ingeniería civil y un compañero de ciencias de la computación, un banco de ensayos, contemplando su concepción, diseño, implementación y operación.

1.2 Objetivos

Se detalla a continuación el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo.

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y Construir una plataforma de pruebas de extrusión y medición de concreto, bajo condiciones controladas, para validar su utilización en la impresión 3D.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificación de los requerimientos dimensionales de las probetas y las pruebas a realizar sobre el concreto, para efectos del dimensionamiento del dispositivo extrusor de probetas.
- Confección de memorias de cálculo y planos de construcción para la validación del diseño de dispositivo extrusor de probetas, dado un rango de características de concreto admisible.
- Diseñar y construir un extrusor de concreto continuo, cuya boquilla tenga una geometría modificable, capaz de desplazarse controlado por el usuario y en un rango de velocidad de extrusión.
- Realizar pruebas piloto del dispositivo extrusor de probetas, tanto mecánicas, como de electro-control.

1.3 Alcances

Los alcances por etapa son mostrados a continuación:

- Etapa de Ingeniería Conceptual: Estudio de antecedentes, observación de casos implementados. Confección de Planos Conceptuales.
- Etapa de confección de Memorias de Cálculo: Selección de elementos mecánicos. Estudios estructurales, validación de motores y memorias de cálculo en general.
- Etapa de Ingeniería de Detalle: Definición detallada de sistemas y subsistemas. Confección de planos de construcción.
- Etapa de fabricación: Compra de elementos comerciales. Fabricación de piezas.
- Etapa de ensamblaje: Unión de piezas de cada subsistema. Unión de subsistemas.
- Etapa de pruebas: Realizar pruebas mecánicas, pruebas eléctricas, pruebas de control y pruebas piloto.

2 Metodología

La metodología general utilizada para el desarrollo de este proyecto es aquella clásica que se obtiene al considerar el diseño como un proceso iterativo (Bernasconi, 2016). La cual sugiere que cada fase interactúa iterativamente a lo largo del proceso de concepción de un producto original. Dichas fases se dividen en: Especificación del Sistema, Diseño Preliminar, Diseño Detallado, Fabricación de Prototipos del Sistema y Pruebas del Sistema. Estas fases se encuentran implícitas en la Metodología específica detalladas a continuación desde la sección 2.1 a 2.5:

2.1 Metodología de etapa de Ingeniería Conceptual

Se comienza con un estudio bibliográfico de los requerimientos generales para una impresora 3D de hormigón, de esta manera poder identificar los parámetros de diseño. De forma paralela, se hace un estudio bibliográfico tanto del sistema de desplazamiento CNC, como de diversos mecanismos de inyección de hormigón factibles para este proyecto. El proceso sigue con un estudio de la factibilidad técnico-económica que considera los factores mencionados anteriormente, además de las restricciones de tiempo, presupuesto y procesos de manufactura disponibles para el estudiante. Una vez que se identifican los materiales y elementos mecánicos para el proyecto, se confecciona un bosquejo que sintetiza la etapa de ingeniería conceptual, finalizando la etapa (Ver Figura 2-1).

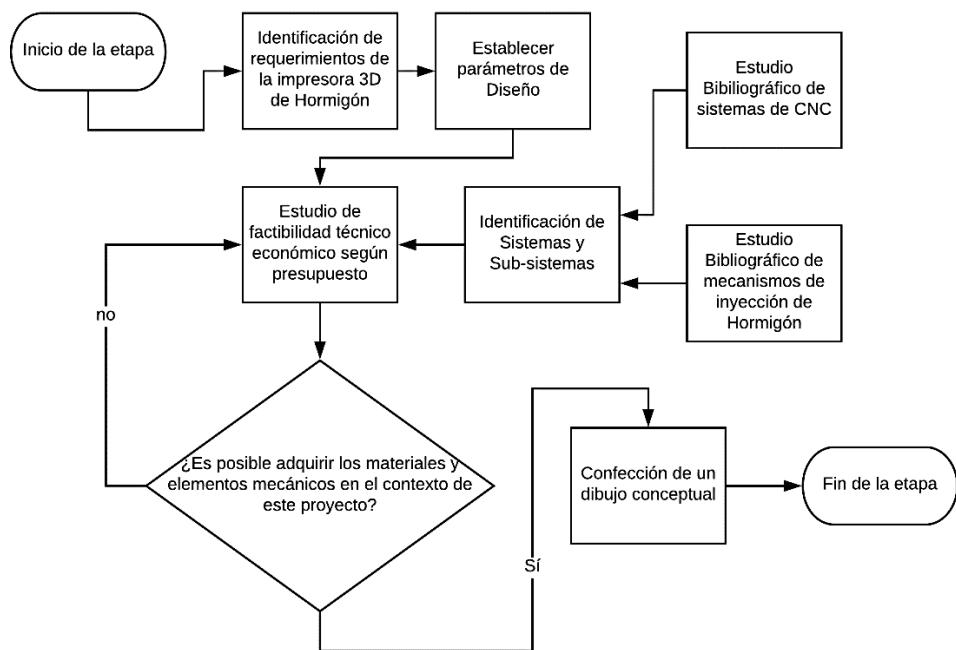


Figura 2-1 Metodología de etapa Ingeniería Conceptual. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Metodología de etapa de confección de Memorias de Cálculo

Esta etapa consiste en un trabajo en paralelo de los siguientes objetos de interés: Cálculo de la Potencia necesaria, Selección de materiales de trabajo, Selección de mecanismos y Confección de un prototipo del extrusor del hormigón.

El cálculo de potencia consiste básicamente en validar los motores *stepper* con los que cuenta la Universidad, los cuales son una restricción a la hora de diseñar la impresora dado el límite presupuestario.

Por otra parte, la selección de los materiales viene justificada por un estudio de resistencia de materiales por medio del modelo de elementos finitos, utilizando el software Inventor. Este cálculo se concentra en el sub-sistema crítico del conjunto: el “puente” que sostiene al extrusor de hormigón.

En forma paralela, se seleccionan los mecanismos de transmisión, de desplazamiento y se seleccionan los rodamientos de cada sistema según parámetros de diseño impuestos en la etapa previa.

Para la validación del dispositivo de extrusión de concreto, se confecciona un prototipo a escala, en el cual se somete a pruebas y se sacan algunas conclusiones cualitativas para la confección del extrusor de hormigón utilizado en el proyecto.

Habiéndose cumplido cada una de las fases expuestas anteriormente, se da por finalizada la etapa de confección de Memorias de Cálculo.

La Figura 2-2 sintetiza por medio de un diagrama de flujo la etapa detallada previamente.

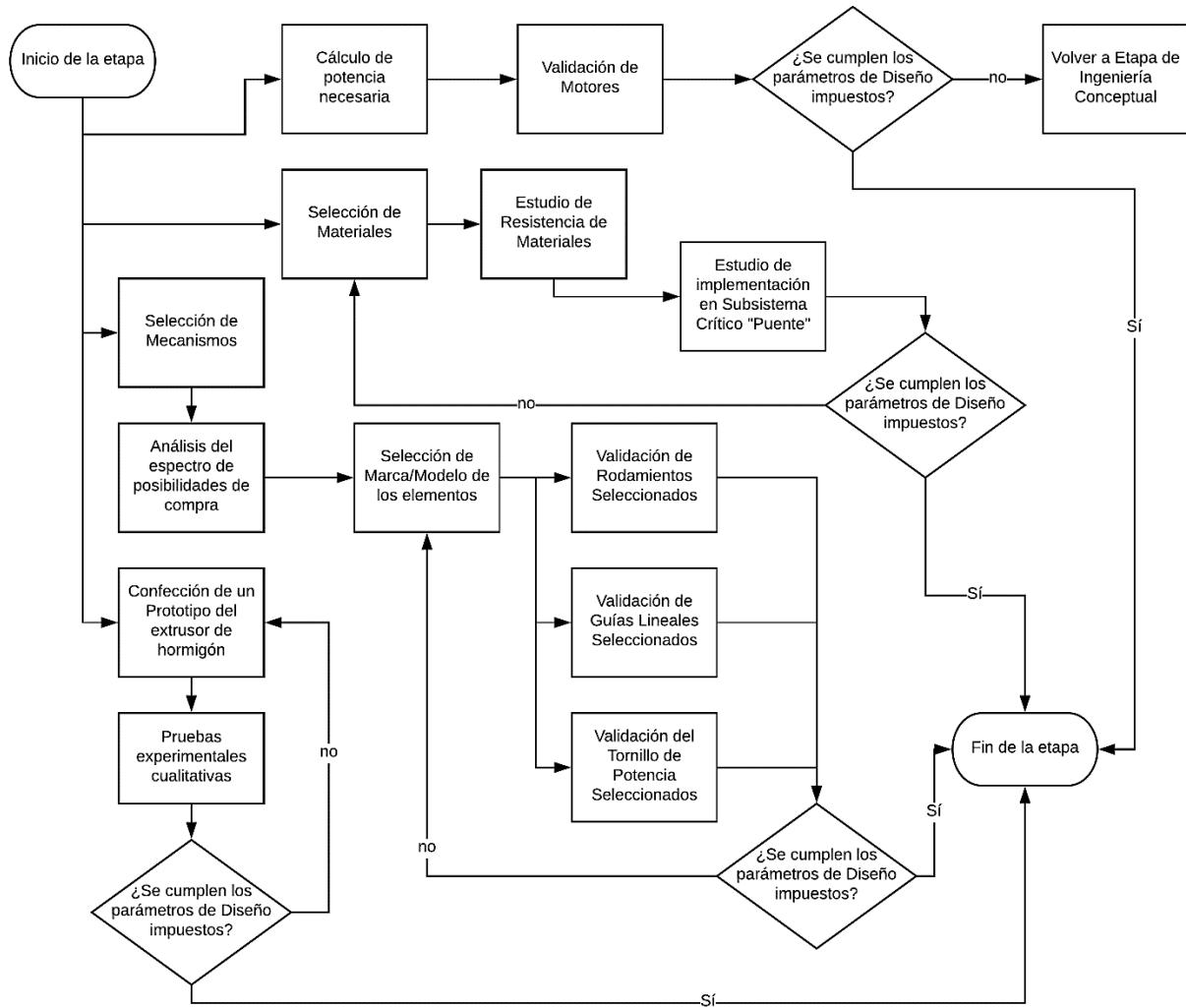


Figura 2-2 Metodología de etapa Memorias de Cálculo. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Metodología de etapa de Ingeniería de Detalle

La etapa comienza con un diseño de las piezas de cada uno de los subsistemas con la ayuda del software Solid Works. Se comienza a diseñar a partir de los elementos comerciales identificados en la etapa anterior y considerando diversos factores asociados al contexto de este proyecto, a saber: restricción presupuestaria, restricción de tiempo, herramientas de fabricación disponibles y accesibilidad de los materiales. Una vez que se diseñan las primeras piezas, se realiza un ensamblaje entre piezas interactuantes y se corrobora que no existan superposiciones geométricas entre ellas, de ser este el caso, se vuelve a la fase anterior para rediseñar las partes involucradas. Posteriormente, se crean dibujos y planos de fabricación y de ensamblaje para seleccionar los elementos de sujeción necesarios. Esta fase podría tener nuevamente implicancias en el rediseño de las piezas según como deben ser el montaje de cada uno de los subsistemas, haciendo de esta etapa, una etapa predominantemente iterativa (Ver Figura 2-3).

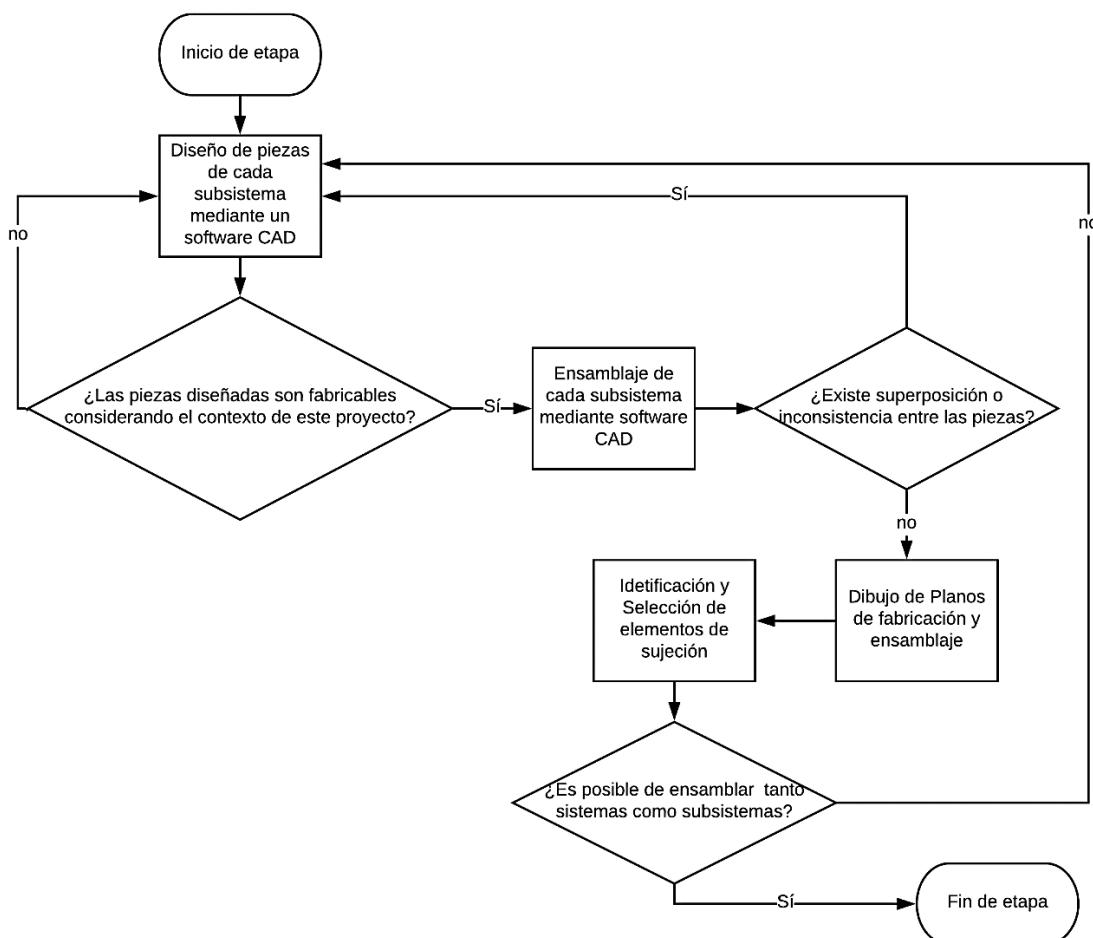


Figura 2-3 Metodología etapa Ingeniería de Detalle. Fuente: Elaboración propia.

2.4 Metodología de etapa de fabricación y ensamblaje

La metodología propuesta para esta etapa comienza con la adquisición de las piezas involucradas en cada subsistema, las cuales se dividen en piezas comerciales o piezas fabricables, a su vez, las piezas comerciales se dividen en piezas que deben ser compradas, o bien, la universidad las puede proveer. En ambos casos, es necesario adaptar dichas piezas para el proyecto. Por otro lado, para adquirir las piezas fabricables es necesario previamente comprar las materias primas y manufacturarlas en las dependencias del departamento. Los distintos tipos de piezas implican distintos modos de adquisición, con distintos plazos y distintos costos por lo que es necesaria una correcta coordinación y planificación con los entes involucrados. Una vez que se tienen las piezas recolectadas, se comienza con el ensamblaje primero de los subsistemas, posteriormente de los sistemas. Cabe mencionar que esta etapa esta cohesionada con la etapa de pruebas, donde existe una constante retroalimentación.

La etapa finaliza con la construcción del conjunto impresora 3D extrusora de hormigón, la Figura 2-4 resume gráficamente el diagrama de flujo con la metodología propuesta.

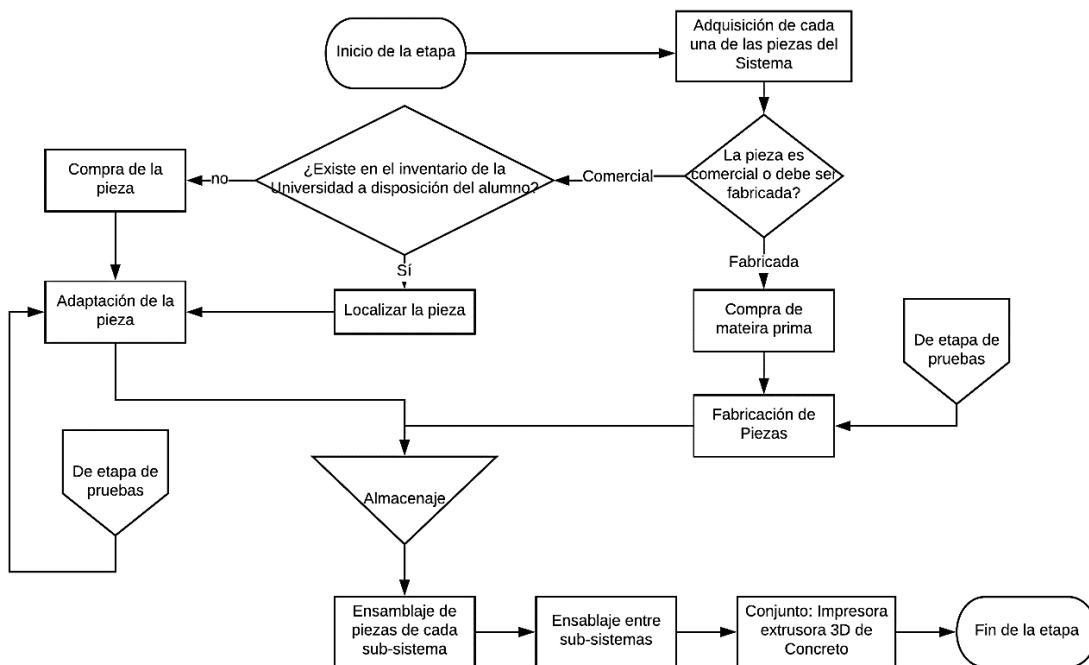


Figura 2-4 Metodología de etapa de Fabricación y Ensamblaje. Fuente: Elaboración propia.

2.5 Metodología de etapa de pruebas

La metodología propuesta para esta etapa comienza con realizar pruebas en ambientes controlados y de manera aislada de cada subsistema, tanto mecánicas como de control electromecánico. Si se presentan resultados no deseados en esta fase, se vuelve a la etapa de fabricación y ensamblaje para la modificación de las pruebas. En el caso de pasar estas pruebas iniciales, se comienza con el ensamblaje entre los subsistemas donde igualmente se realizan pruebas mecánicas y de control electromecánico. De manera similar a la fase previa, en el caso de presentarse resultados indeseados, se realiza una modificación del subsistema que presenta problemas. Una vez que los sistemas obtienen los resultados esperados, se realizan pruebas del conjunto completo. De presentarse problemas, se realizan modificaciones al sistema defectuoso, volviendo a las fases iniciales de esta etapa. Cuando el conjunto responde de manera satisfactoria a las pruebas tanto mecánicas como de control electromecánico, se realizan las primeras impresiones y pruebas con diversos tipos de hormigones, dando por finalizada esta etapa.

La Figura 2-5 muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta para la etapa de pruebas.

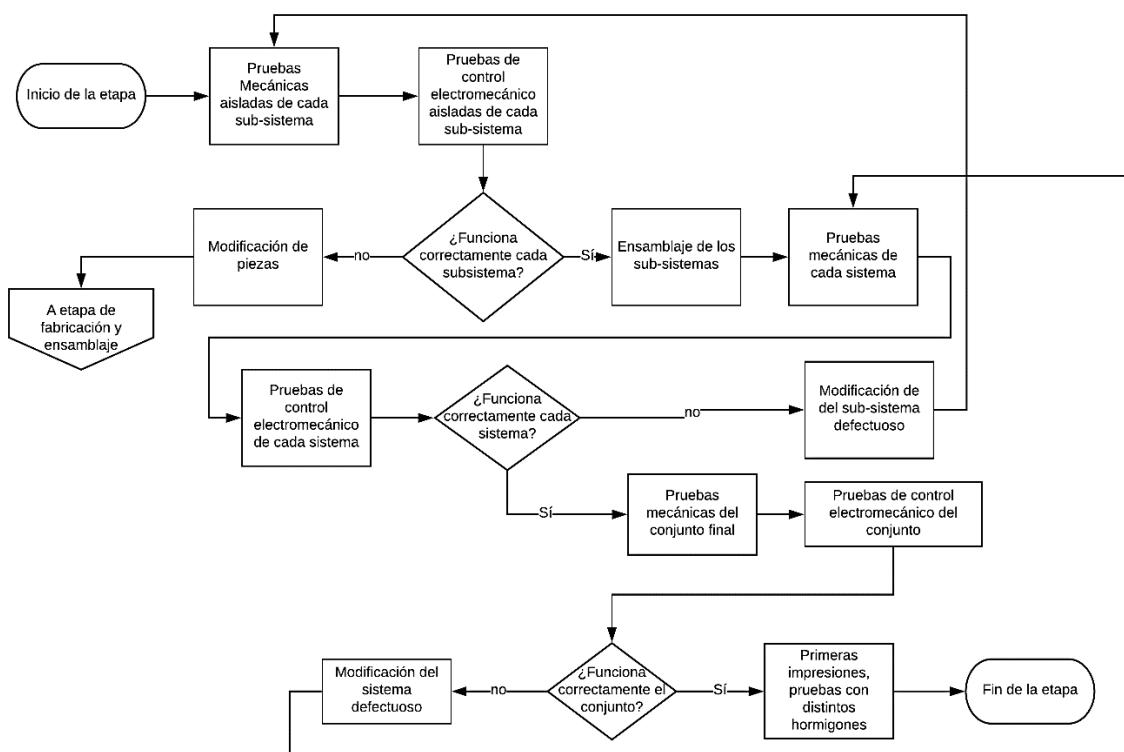


Figura 2-5 Metodología de etapa de pruebas. Fuente: Elaboración propia.

3 Antecedentes

3.1 Impresoras 3D de Concreto

Este trabajo de título busca dar inicio a una serie de desarrollos multidisciplinarios que tienen como fin la creación de una impresora 3d de concreto, la cual sea válida para su implementación según la normativa de construcción nacional vigente.

Sin embargo, previo a la concepción de esta impresora, es necesario determinar las propiedades del material de trabajo por medio de ensayos controlados la cual verifique que sea apta para la construcción, y bajo qué tipo de condiciones de extrusión. En este sentido, nace la necesidad de crear un dispositivo extrusor de probetas, además de un protocolo de experimentos que permita dar con dicho hormigón. El siguiente diagrama simplifica el cómo está dividido conceptualmente este gran proyecto central y señala en qué etapa corresponde los presentes trabajos de título.

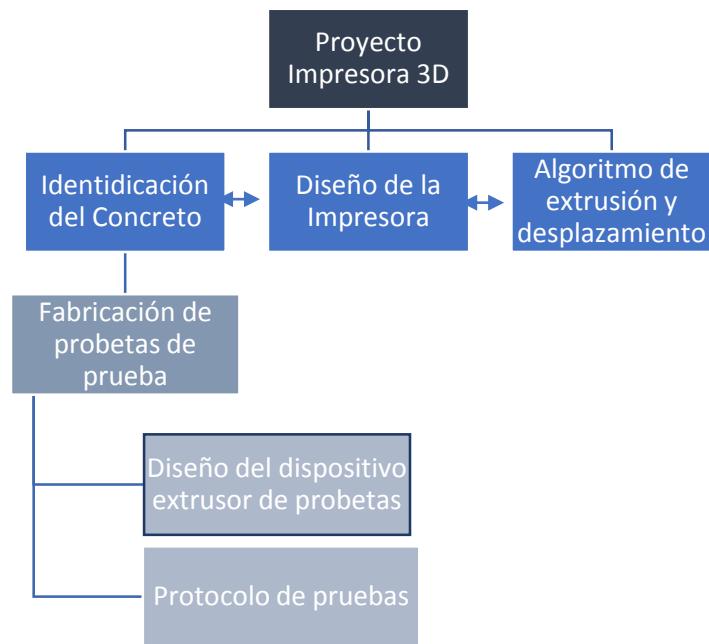


Figura 3-1 Esquema proyecto Impresora 3D de concreto. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-1Figura 3-1 se puede ver remarcado en un recuadro la fase asociada al desarrollo del presente trabajo. En consecuencia, se propone un trabajo de diseño y construcción del dispositivo extrusor de probetas con su protocolo de pruebas respectivo, desarrollado en manera paralela con un memorista del departamento de Ingeniería Civil.

Es necesario destacar que a lo largo de este proyecto existe un trabajo interdisciplinario en la que hay un constante cruzamiento de información entre las tres disciplinas involucradas: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Civil e Ingeniería Informática.

3.2 Requerimientos para el dispositivo extrusor de probetas y el extrusor

En una primera aproximación, se realiza un estudio de las condiciones en las que fueron realizados los experimentos de concreto según la bibliografía estudiada, donde se enlistará los principales detalles técnicos a considerar, en modo tal de poder replicar dichas plataformas de pruebas y repetir las metodologías experimentales. Se hace un especial énfasis en las características del extrusor.

1. Las pruebas típicamente consisten en una inyección lineal de concreto, de un largo de 30 cm (LE, 2012). Alternativamente, se realizan inyecciones de capas del mismo largo para el estudio de su resistencia bajo su propio peso, con una capacidad de impresión en altura de hasta 10 capas de 15mm de espesor (Kazemian, 2017).
2. Para el estudio de las propiedades mecánicas al orientar los filamentos de reforzamiento, se solicita la construcción de cubos y barras según las medidas y desplazamiento del extrusor como se indicadas en la siguiente imagen (Figura 3-2).

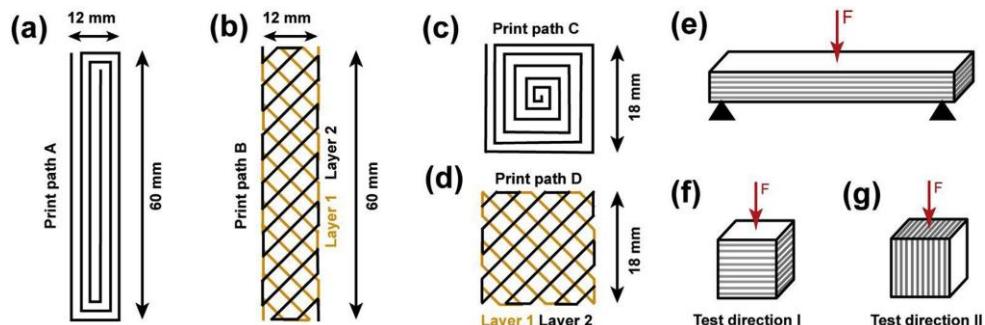


Figura 3-2 a) y b) corresponden a las especificaciones de la impresión de una barra, c) y d) son las especificaciones de impresión de un cubo. e) corresponde a la dirección de la fuerza de ensayo de la barra. f) y g) es la fuerza de ensayo para el cubo. Fuente: (Kazemian, 2017)

En consecuencia, para este tipo de experimentos, se solicita que la impresora pueda tener desplazamiento en los tres ejes, además de la capacidad de imprimir capas con un espesor de 1,5 mm y un diámetro de 2 mm en el extrusor.

3. Los extrusores utilizados tienen un rango de desplazamiento lineal entre los 2 y los 7 [mm/s] (Kazemian, 2017)
4. La boquilla del extrusor posee un amplio rango de geometrías de paso, pueden ser de sección elíptica, o redondas. En general, los diámetros varían desde los 2mm para el estudio del concreto donde se desea una orientación preferente de los filamentos de reforzamiento (Hambach, 2017). Hasta los

- 9mm de diámetro (LE, 2012), los que podrían ser aún mayor (del orden de los 20 mm) para un experimento donde se prefiera mayor velocidad en desmedro de la resolución.
5. La presión de inyección deseable se encuentra del orden de los 3 bar (Hambach, 2017).

3.3 Rango de propiedades del Concreto

Del trabajo realizado por el compañero de Ingeniería Civil, se extrae un resumen de las propiedades del material de extrusión.

Previamente, se proponen y presentan los principales materiales constituyentes que pueden ser utilizados en una mezcla de hormigón para la impresión 3D:

Cemento: Principalmente utilizan cementos de alta resistencia, que por lo general son más finos. Estos cementos de gran finura reducen la trabajabilidad y por ende necesitan mayor demanda de agua, pero se hidratan con mayor rapidez.

El cemento Portland es la opción más viable en métodos de impresión 3D.

Es recomendable que la mezcla óptima tenga la relación agua/cemento (a/c) más baja y que pueda cumplir con todos los estándares requeridos.

Áridos: Es importante seleccionar un tamaño de árido menor a los hormigones convencionales debido a la propiedad de extrudabilidad, por lo que es recomendable seleccionar áridos de un tamaño máximo cercano a 2 o 3 mm para que no ocurra bloqueo u obstrucción. Además, es importante determinar una cantidad adecuada de áridos, una elevada cantidad podría causar segregación de la mezcla, provocando una mala extrudabilidad.

Adiciones: Podrían ser de gran ayuda la inclusión de algunos aditivos como el humo de sílice y las cenizas volantes.

1. Humo de sílice: adición especialmente utilizada para hormigones de alta resistencia, es un material de alta reactividad, extremada finura y alto contenido de dióxido de silicio, lo que permite la eliminación de porosidad (mejora en la calidad de extrusión), mejora la cohesión del hormigón fresco, aumenta la resistencia, mejora la impermeabilidad del hormigón endurecido y aumenta la durabilidad.
2. Cenizas volantes: adición utilizada por razones económicas debido a que se reduce el contenido de cemento y por los cambios microestructurales, que generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro (calidad de extrusión).

Fibras de polipropileno: Las fibras de polipropileno para el uso en morteros y hormigones se recomiendan en aplicaciones horizontales y verticales, las cuales principalmente reducen las fisuras por retracción plástica y por secado durante el periodo de fraguado y otorgan un refuerzo tridimensional, reduciendo la deformación en estado

plástico (mejora en la edificabilidad y calidad de extrusión). Esto es muy importante para la impresión de hormigón, ya que se anticipa una mayor tasa de evaporación de agua para un elemento impreso, dado que no hay encofrado que cubra la superficie de los elementos recién impresos.

Agua: El contenido de agua debe tratar de ser el mínimo para que la mezcla tenga una mayor resistencia. El uso de superplastificantes podría ser beneficioso.

Aditivos: El rol de los aditivos en una mezcla de impresión es fundamental, ya que gracias a ellos se podrán hacer los ajustes pertinentes para responder a las propiedades críticas del hormigón de impresión.

1. Superplastificante: utilizado principalmente para aumentar la trabajabilidad o reducir el contenido de agua de la mezcla y aumentar la resistencia. Su uso es fundamental para responder a la propiedad de extrudabilidad, sin embargo, su uso excesivo podría afectar la propiedad de edificabilidad y calidad de extrusión.

T.T.Le en su experimentación determinó un decaimiento exponencial de la resistencia al corte (trabajabilidad) de una mezcla en función de la dosificación de superplastificante.

2. Retardante: utilizado para retrasar el inicio del fraguado. En términos de trabajabilidad, el retardante es utilizado para mantener su nivel en un mayor tiempo. Su uso es fundamental para aumentar el tiempo abierto óptimo de la mezcla y aumentar el tiempo en que se logra una buena adherencia entre capas.

El comportamiento de la trabajabilidad en términos de resistencia al corte en función de la dosificación de retardante muestra una disminución lineal.

3. Acelerante: utilizado para acortar el inicio del fraguado. Su uso podría ser útil para regular la edificabilidad de la mezcla, debido a que podría acelerar el proceso de ganancia de resistencia. Algunas investigaciones proponen utilizar este aditivo justo antes de extruir una capa.

El comportamiento de la resistencia al corte (trabajabilidad) presenta un aumento cuadrático en función de la dosificación de acelerante.

Asimismo, el compañero de Ingeniería Civil crea una tabla que resume las propiedades del hormigón en cada una de las referencias bibliográficas estudiadas, la cual es replicada en este documento. (Ver Tabla 1)

Tabla 1 Resumen de diferentes propiedades del hormigón empleado para la impresión 3D. Fuente: Trabajo de título paralelo a este trabajo.

Diseño de Mezcla	Hormigón Convencional	T.T.Le et al [21]	Contour Crafting	Ali Kazemian et al [20]	Zeina Malaeb [23]
Cemento	~10-15 % de la mezcla	Cemento CEM tipo I 52,5 ~25% de la mezcla ~70 % en peso de aglutinante	Cemento Portland tipo II ~30 % de la mezcla	Cemento Portland tipo II ASTM C150 ~25-28 % de la mezcla	Cemento tipo I ~30% de la mezcla
Humo de Silice	-	Humo de Silice no densificado ~10 % del peso de aglutinante	-	Humo de Silice densificado ~2-3 % de la mezcla	-
Cenizas volantes	-	~20 % del peso de aglutinante	-	-	-
Aridos	~65-75 % de la mezcla	Arena de tamaño máximo 2 mm ~54 % de la mezcla	Arena ~41 % de mezcla	Arena de tamaño máximo 2,36 mm ~59 % de la mezcla	Agregado de tamaño máximo 2 mm ~58 % de la mezcla
Agua	~15-20 % de la mezcla	~10 % del peso de la mezcla	~19 % de la mezcla	~10-12 % de la mezcla	~11 % de la mezcla
Superplastificante	-	~1 % en peso de aglutinante	~3 % de la mezcla	Superplastificante a base de policarboxilato (HRWRA) ~0,05-0,16 % en peso de aglutinante	Superplastificante Viscocrete ~0,8 % del peso de cemento
Retardante	-	~0,5 % en peso de aglutinante	-	-	~0,5 % del peso de cemento
Acelerador	-	-	-	Acelerador basado en Cloruro de calcio ~1-3 % en peso de cemento	~0,8 % del peso de cemento
Modificador de viscosidad	-	-	-	Modificador de viscosidad (VMA) ~0,1 % del peso de aglutinante	-
Fibras de polipropileno	-	Fibras de 12 mm de longitud y 0,18 de diámetro ~1,2 kg/m ³	-	Fibras de 6 mm de longitud y resistencia a la tracción de 415 MPa ~1,18 kg/m ³	-
Arcilla	-	-	-	Arcilla de atapulgita (en caso de no utilizar fibras) ~0,3 % del peso de aglutinante	-
Proporciones	agua/cemento = ~0,5	agua/aglutinante ~0,26	agua/cemento = ~0,5	agua/aglutinante = ~0,43	agua/cemento = ~0,39
Resistencia a compresión	~30 MPa para un hormigón H30	~110 MPa a 28 días	~18,9 MPa	~45-50 MPa a 28 días	~42 MPa
Resistencia a flexión	~4 MPa para un hormigón HF4	~12 MPa a los 28 días (Resistencia objetivo)	-	-	-

3.4 Firmware y Software

Para el control del equipo, se recurre al lenguaje de programación **G-code**, ampliamente utilizado para el control de máquinas de herramientas como fresas, cortadoras, tornos e impresoras 3D. Indicando a la máquina qué hacer y cómo hacerlo, definidos mayoritariamente por instrucciones sobre a dónde moverse, cuán rápido y qué trayectoria seguir.

De forma paralela, el firmware utilizado para este equipo es una versión adaptada del firmware de código abierto **Marinlin**, basado en la plataforma arduino, la que en esta ocasión, se omiten parámetros como la temperatura de calentamiento del material, la cual no aplica para estos requerimientos.

El software utilizado para el control del equipo es el Repetier-Host, el cual es compatible con la mayoría de los firmwares disponibles en internet, incluyendo el mencionado anteriormente, Marinlin. Este software, entre otras cosas, permite configurar la impresora, controlar sus velocidades de desplazamiento y extrusión. Además, por medio de su interfaz gráfica, recibe archivos de formato CAD, como *.stl y los transforma en lenguaje de programación g-code. La Figura 3-3 muestra la una vista de pantalla del software.

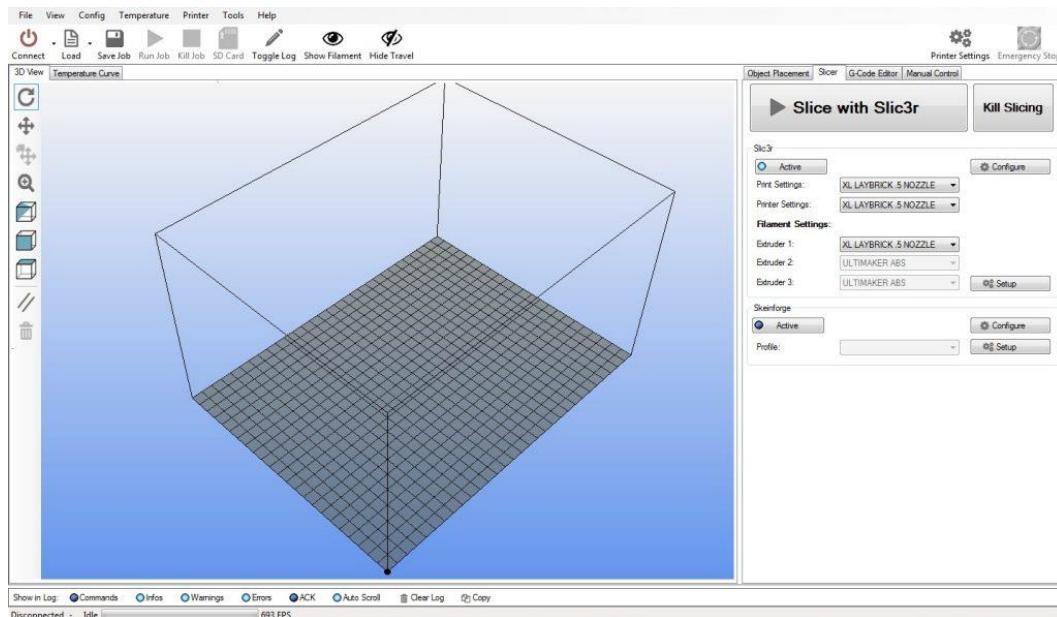


Figura 3-3 Interfaz Gráfica del software Repetier-Host. Fuente: <https://airwolf3d.com>

3.5 Motor Disponible

En el laboratorio de fabricación digital se encuentra a disposición de los alumnos 8 motores *stepper* adquiridos con propósitos similares a los de este trabajo. A su vez, cada motor cuenta con su propia fuente de poder y un driver que permite manipularlos con señales provenientes de un controlador (por ejemplo, Arduino), la siguiente figura (Figura

3-4) muestra un esquema de este motor. Lo sigue a continuación una Tabla (Tabla 3-2) con sus principales características.

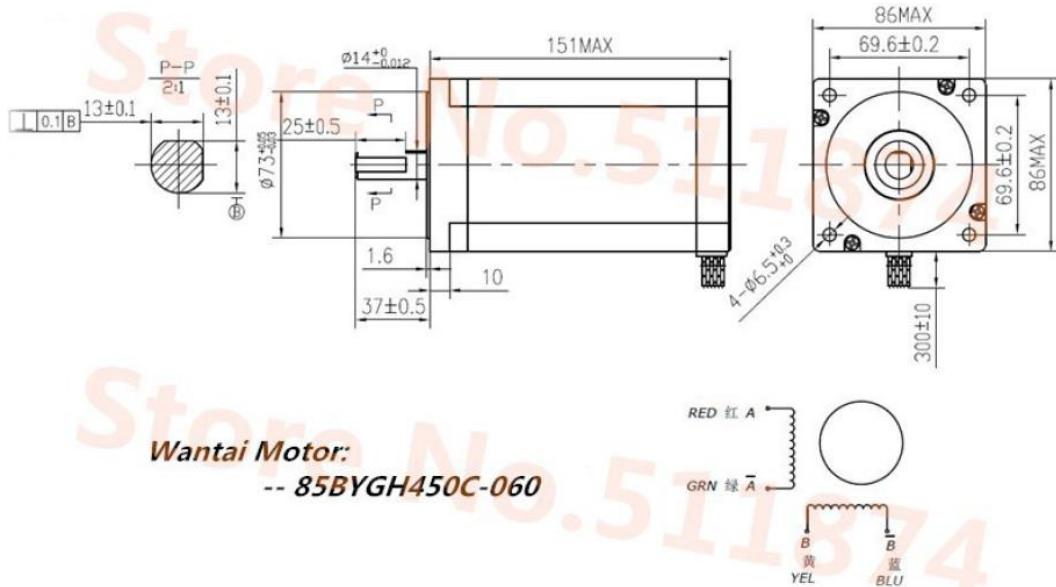


Figura 3-4 Plano del motor con sus principales cotas. Fuente: ¡Error! Marcador no definido.

Tabla 3-2 Principales características de los motores **stepper** a utilizar. Fuente: ¡Error! Marcador no definido.

Modelo	85BYGH450C-060
Ángulo de Paso	1.8°
Largo del motor	151 mm
Voltaje	3.6 V
Corriente	6 A
Resistencia de fase	0.6 Ω
Inductancia de fase	6 mH
Par de retención	12.0 Nm
Cables de conducción	# 4
Inercia rotacional	4000 gc m ²
Par de fijación	24.5 (N cm)
Peso del motor	5 kg

El siguiente gráfico (Figura 3-5) muestra la curva de torque [Nm] en función de las revoluciones del motor (pulsos por segundo, ppm) entregada por el fabricante.

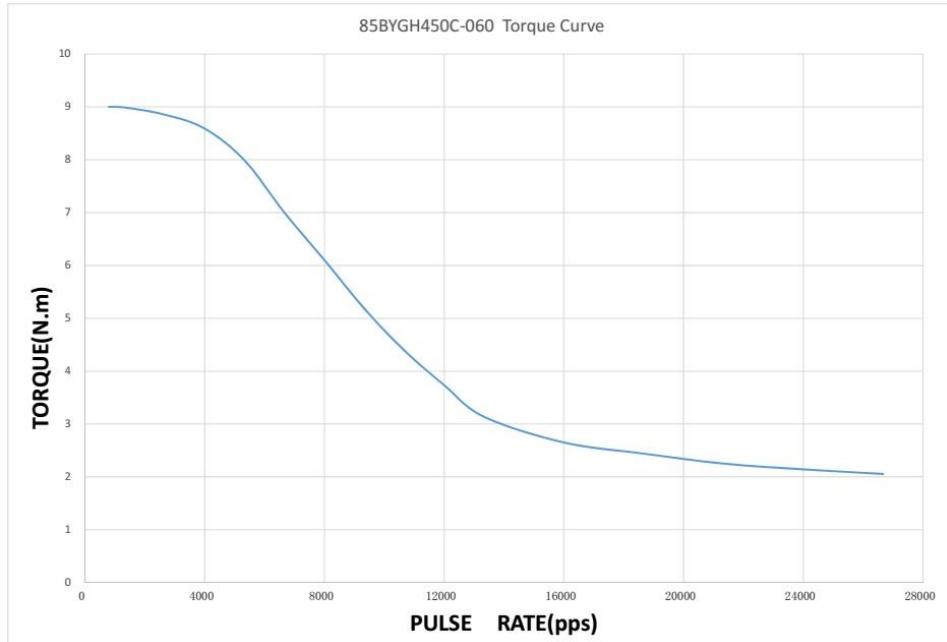


Figura 3-5 Curva de Torque según los pulsos por segundo. Fuente: <https://es.aliexpress.com>

Debido al costo de un motor con prestaciones similares, y dado que están a disposición de este proyecto, serán considerados como componentes fijos y se adaptará el diseño del dispositivo extrusor de probetas para su óptima utilización. Sin embargo, estos motores son suficientemente potentes y no se espera un rendimiento limitado del dispositivo extrusor de probetas.

En la práctica, se necesitarán 04 motores modelos 85BYGH450C-060 distribuidos de la siguiente manera:

- 01 motores para el movimiento del puente en el eje Y.
- 01 motor para el movimiento del inyector a lo largo del puente (eje X).
- 01 motor para el movimiento del inyector en el eje Z.
- 01 motor para girar el tornillo del extrusor.

3.6 Identificación de sistemas y subsistemas

En base a los casos estudiados en la sección anterior, es posible realizar, en una etapa conceptual la identificación de los siguientes sistemas y sub sistemas:

1. Arquitectura estructural.
 - Marco estático
 - Base
 - Puente
2. Sistema de movimiento mecánico del cabezal extrusor.
 - Desplazamiento en X
 - Desplazamiento en Y
 - Desplazamiento en Z
3. Inyección.
 - Extrusión
 - Alimentación de aditivo
4. Control electromecánico
 - Microcontrolador
 - Actuadores
 - Sensores
 - Fuente de Poder
 - Firmware
5. Aislamiento de componentes eléctricos
 - Ventilación
 - Sistemas de fijación
 - Compartimientos

3.7 Parámetros de Diseño

Una vez revisada la bibliografía en cuestión, se esbozan los siguientes parámetros de diseño, los cuales se imponen como restricciones para el diseño propuesto en la ingeniería Conceptual de este dispositivo de extrusión.

- Costo de construcción no mayor a \$1.200.000
- Área mínima de impresión: 300X300X300mm
- Movimiento en el espacio cartesiano (X-Y-Z)
- Boquilla sustituible para diversos experimentos.
- Capacidad de extruir 10 capas de 15mm de alto cada una.

4 Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las etapas en la que el proyecto se divide, a saber: Ingeniería Conceptual, Memorias de Cálculo, Ingeniería de Detalle, Fabricación y ensamblaje, y Pruebas.

4.1 Ingeniería Conceptual

En esta etapa se realizaron las primeras definiciones conceptuales del proyecto. Para su mejor comprensión, se muestra inmediatamente el bosquejo resultante, seguido de un listado de acotaciones destacables que justifican la ingeniería Conceptual. Para una comprensión más completa del dibujo, ver los planos de **o-o** a **o-4**, indexado en los anexos.

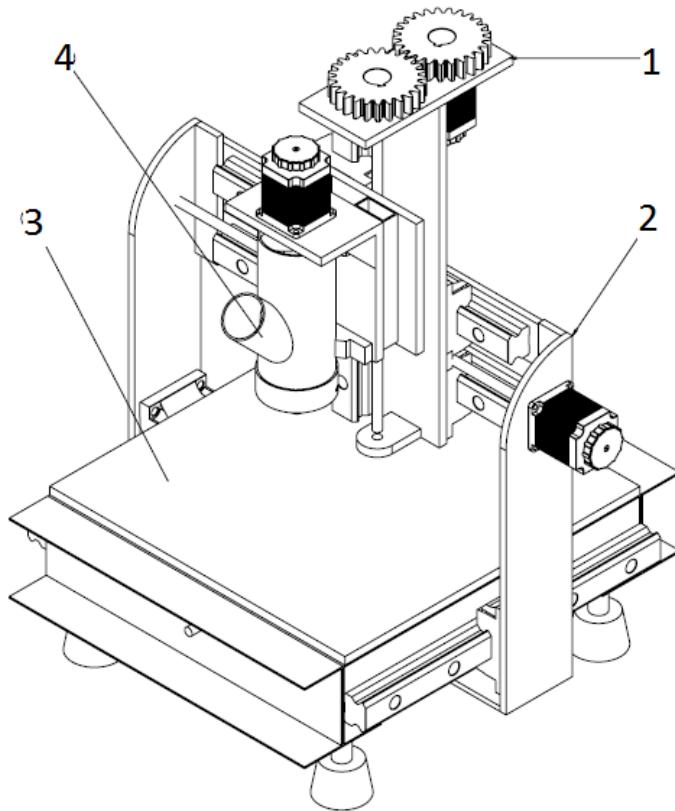


Figura 4-1 Bosquejo conceptual del conjunto. Fuente: Elaboración propia

Entre los resultados arrojados en esta etapa, podemos identificar dos grandes sistemas divididos en 4 o 5 sub sistemas, a saber:

1. Sistema de Extrusión.
 - Extrusor de concreto y porta-extrusor (4)
2. Sistema de desplazamiento.
 - Mesa de desplazamiento Horizontal (1)
 - Mesa de desplazamiento vertical (1)
 - Puente (2)
 - Mesa de desplazamiento Frontal, o Base (3)

El extrusor mostrado en la figura anterior es una versión adaptada de un proyecto de tesis de magister de la Universidad de Lund, autoría de Lars Henrik Anell (ver Figura 4-2).

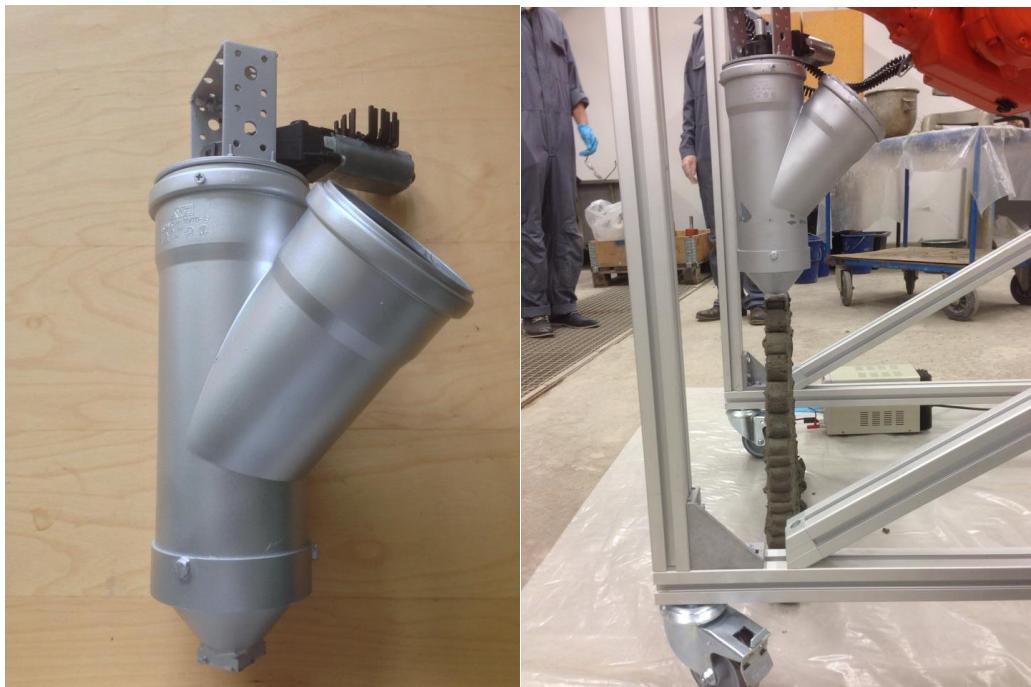


Figura 4-2 a) Extrusor modelo b) extrusor en funcionamiento. Fuente: (Anell, 2015)

Luego de una revisión del documento encontrado en la web, se determina que los pasos previos que llevaron al diseño final de este dispositivo son confiables y siguen una metodología correcta que se detalla en el mismo reporte. Asimismo, el autor sugiere una serie de modificaciones para su reproducción que fueron consideradas para este proyecto. Dicho esto, y dada las restricciones de tiempo, se decide utilizar una versión adaptada de este extrusor, acompañado de un prototipo a escala de modo de poder obtener conclusiones independientes del trabajo citado. Dicha maqueta se desarrolla en la siguiente sección.

De manera paralela, para el sistema de desplazamiento se utiliza uno de geometría cartesiana, ya que es más intuitivo y fácil de programar, además de que resiste de mejor manera el peso del hormigón (Sanchez, 2015). Este mismo peso fue considerado para seleccionar las guías de desplazamiento. Se determina que las guías lineales son las más idóneas para la cantidad de masa a desplazar. La configuración vertical de las guías

lineales en el subconjunto base fue propuesta de esa manera con el fin de maximizar el área de trabajo de la impresora.

De la misma forma, el sistema de transmisión de potencia fue seleccionado en base a la precisión y cantidad de torque requerido, las cuales fueron detalladas previamente en los parámetros de diseño.

Por otro lado, para el desplazamiento frontal del extrusor, se define que la potencia será transmitida solamente por un motor central, el cual desplaza el puente. Esto es debido a que una configuración de dos motores dificulta la coordinación precisa entre ellos, además que incrementa los costos en materiales. Por otro lado, la potencia del motor es suficiente como para desplazar todos los subsistemas involucrados.

Por otra parte, en la etapa de ingeniería conceptual, es previsible que exista una superposición de elementos mecánicos en la zona alta de la impresora, por lo que se plantea un cambio de dirección del motor, acompañado de un sistema de engranajes que transmita la potencia, tal como se muestra en la figura. Sin embargo, en las etapas posteriores se logra ver que esta configuración es evitable cambiando ciertas disposiciones, por lo que se prescinde de ellos.

Finalmente, y cómo es posible de ver en los planos adjuntos, las dimensiones definidas distan mucho del conjunto definitivo, donde las dimensiones de longitud, en un orden aproximado llegan a ser el doble de los planteados en la ingeniería conceptual. Este cambio surgió porque, una vez realizado los posteriores cálculos presupuestarios, extender las dimensiones no implicaba mayores costos adicionales de fabricación, por lo que se optó por maximizarlos en función del largo máximo de los tornillos de potencia que es posible encontrar en el mercado (aproximadamente un metro).

4.2 Memorias de Cálculo

A continuación, se presenta las memorias de cálculo que justifica los elementos mecánicos seleccionados que forman parte del dispositivo extrusor de concreto. Se utilizaron diversos ejemplos que los mismos proveedores de elementos mecánicos ofrecen para la confección de estas memorias de cálculo: (THK) (TOSOK).

4.2.1 Justificación husillo de desplazamiento en z

La Figura 4-3 muestra el subsistema en estudio. Debido a un equilibrio de masas se propone situar el motor de desplazamiento en la parte posterior de la mesa de desplazamiento vertical. El cual consiste en el husillo y un riel con su respectivo bloque. La transmisión de potencia será por medio de un sistema de engranajes simples de relación de velocidades angulares 1:1. Esto en consecuencia trae una pérdida de eficiencia en el eje de alrededor de un 2%.

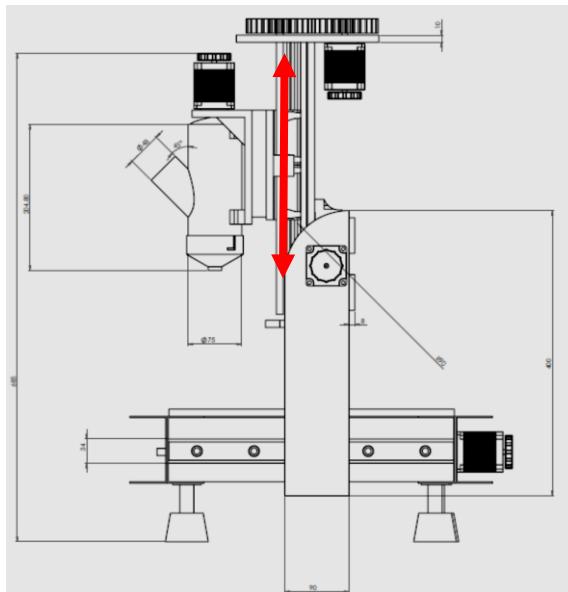


Figura 4-3 Esquema del desplazamiento en Z. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1 Parámetros de Diseño

A continuación (Tabla 4-1), se presentan los parámetros de diseño, de los cuales se obtendrán los requerimientos tanto del husillo como del motor *stepper*.

Tabla 4-1 Resumen de los parámetros de diseño, desplazamiento en z. Resumen de los parámetros de diseño, desplazamiento en z. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Masa Extrusor (incluido el concreto)	$m_e = 11 \text{ kg}$
Masa Portabloques	$m_b = 2 \text{ kg}$
Largo Carrera	$l_s = 500\text{mm}$
Precisión	$p = 0.05 \text{ mm}$
Velocidad Máxima	$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$
Tiempo de Aceleración (aproximado)	$t_1 = 0.2 \text{ s}$
Tiempo de Desaceleración (aproximado)	$t_2 = 0.2 \text{ s}$
Número de Reciprocaciones por minuto (aproximado)	$n = 5 \text{ rpm}$
Vida útil de servicio requerida	7680hr
Motor	AC Servo, 6000 rpm máximo
Momento de Inercia del Motor	$J_m = 4 \times 10^{-4} \text{ Kgm}^2$
Reducción	Ninguna (sistema de engranajes 1:1)
Coeficiente de Fricción del sistema bloque/riel (aproximado)	$\mu = 0.003$ (<i>inclinación</i>)
Resistencia superficial del sistema bloque/riel (aproximado)	$f = 20 \text{ N}$ (<i>sin carga</i>)

4.2.1.2 Justificación del Husillo, dirección en Z

4.2.1.2.1 Suposición del largo total del husillo

El largo de la carrera considerado como parámetro de diseño para el movimiento vertical es de 400mm, por lo que, al considerar el espesor de la nuez, además de su elemento sostenedor se optará por un largo de final de 500mm. Sin embargo, debido a que los husillos encontrados en el mercado suelen venir con el hilo en todo el largo del eje, se debe considerar espacio para el mecanizado de los extremos. En consecuencia, un husillo de al menos 600mm es necesario para el desplazamiento vertical.

4.2.1.2.2 Selección del tipo de montaje del husillo

Dado que se asume una carrera de 500mm de largo para el husillo, además de una velocidad máxima de 0.07 m/s. Se opta por una configuración de montaje del tipo fijo-libre en los extremos. Se descarta la opción fijo-fijo debido a su complejidad estructural y a las altas precisiones requeridas en su instalación.

4.2.1.2.3 Selección del paso del husillo

Se requiere una precisión de 0.05 mm para la extrusión de concreto. Por otro lado, el motor a disposición tiene una capacidad de desplazarse 1.8° por pulso, lo que permite 200 ángulos posibles dentro de una vuelta completa.

Considerando las capacidades del motor *stepper*, un husillo de 10mm de paso bastaría para satisfacer la precisión requerida. Sin embargo, dada la disponibilidad del mercado estudiada en la etapa conceptual, es más común encontrar husillos de 5mm de paso, lo que entrega una precisión de 0.025mm. En consecuencia, se buscará un husillo con estas características.

4.2.1.2.4 Estudio de las cargas axiales admisibles.

1. Cálculo de la máxima carga axial:

Se identifican 6 tipos de fuerzas axiales diferentes dependiendo de si el desplazamiento se está realizando hacia arriba, o bien hacia abajo, además de la fase en la que se encuentra dicho desplazamiento (aceleración, uniforme o desaceleración). A continuación, se muestran los parámetros de diseño que participan en el estudio de las diferentes cargas aplicadas a lo largo del husillo:

Resistencia superficial de las guías

$$f = 20 \text{ N (sin carga)}$$

Masa del extrusor

$$m_e = 11 \text{ kg}$$

Masa Portablockes

$$m_b = 2 \text{ kg}$$

Velocidad máxima

$$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$$

Tiempo de aceleración

$$t_1 = 0.2 \text{ s}$$

A partir de los parámetros de diseño impuestos, se obtiene la aceleración:

$$\alpha = \frac{v_{max}}{t_1} = 0.35 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

En consecuencia, las distintas cargas que aparecen en cada una de las fases son:

- Durante la aceleración en subida:

$$F_{a1} = (m_e + m_b)g + (m_e + m_b)\alpha + f = 152.1[N] \quad (2)$$

- Durante el movimiento uniforme en subida:

$$F_{a2} = (m_e + m_b)g + f = 147.53[N] \quad (3)$$

- Durante desaceleración en subida:

$$F_{a3} = (m_e + m_b)g - (m_e + m_b)\alpha + f = 143[N] \quad (4)$$

- Durante aceleración en bajada:

$$F_{a4} = (m_e + m_b)g - (m_e + m_b)\alpha - f = 103[N] \quad (5)$$

- Durante el movimiento uniforme en bajada:

$$F_{a5} = (m_e + m_b)g - f = 107.5[N] \quad (6)$$

- Durante desaceleración en bajada:

$$F_{a6} = (m_e + m_b)g + (m_e + m_b)\alpha - f = 112.1[N] \quad (7)$$

En consecuencia, la mayor carga ocurre durante la aceleración en subida y su valor es de $F_{aMax} = F_{a1} = 152.1 [N]$.

2. Carga crítica de pandeo en el husillo:

Según la fórmula de Euler, la carga crítica, P_{crit} que produce pandeo en elemento de características comprimidas y esbeltas está dada por:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2 EI}{L_z} \quad (8)$$

Donde:

- E : Modulo de Young ($2.06 \times 10^5 [\frac{N}{mm^2}]$).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64} d^4$).
- L_z : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_z = 550mm$).
- $n=2$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).

Para este cálculo, se asume un diámetro de raíz de 14mm, además de una distancia entre los puntos de pontaje de aproximadamente 550 mm. De esta manera, se tiene como carga crítica:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2 EI}{L_z^2} = \frac{2 * \pi^2 * 2.06 \times 10^5 * \frac{\pi}{64} * (14)^4}{550^2} = 25400[N] \quad (9)$$

3. Cargas de Tracción/Compresión admisibles para el husillo

La carga límite para que el husillo no falle por fluencia está dada por la siguiente ecuación, donde σ_{cr} es el límite de fluencia característico del material. Nuevamente se asume un diámetro de 14mm:

$$P_2 = \sigma_{cr}A = 147 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{\pi}{4} 14[mm]^2 = 22629[N] \quad (10)$$

En conclusión, tanto la carga crítica para evitar pandeo, como la carga crítica para la falla por fluencia están por sobre las cargas operativas del desplazamiento en z. En consecuencia, un husillo de estas características geométricas operará sin mayores complicaciones.

4.2.1.2.5 Estudio de la velocidad de rotación admisible

1. Máxima velocidad de Rotación

El estudio de la máxima velocidad de rotación que tendrá el husillo implica la utilización de los siguientes parámetros:

Diámetro del tornillo, d_t 16mm

Paso, Ph 5mm

Máxima Velocidad, v_{max} 0.07 $\frac{m}{s}$

De esta manera, la velocidad de rotación máxima es:

$$N_{max} = \frac{v_{max} * 60 * 10^3}{Ph} = \frac{0.07 * 60 * 10^3}{5} = 840 \text{ rpm} \quad (11)$$

2. Velocidad de Rotación de resonancia del husillo

Es necesario analizar el número de revoluciones por minuto para el cual el husillo en cuestión entra en resonancia. Dicha velocidad crítica viene dada por:

$$N_{res} = \frac{60 * \lambda^2}{2\pi * L_c^2} \sqrt{\frac{E * I * g}{\gamma * A}} * \alpha \quad (12)$$

Donde:

- E : Modulo de Young (2.06×10^5 [$\frac{N}{mm^2}$]).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64} d^4$).
- L_c : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_c = 550mm$).
- $\lambda = 3.926$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).
- $g = 9.81$ aceleración de gravedad
- A es el área de la sección del husillo ($\frac{\pi}{4} d^2$).
- $\alpha = 0.5$
- $\gamma = 7.7 \times 10^{-5}$ [$\frac{N}{mm^2}$] la gravedad específica

En consecuencia, el valor de la frecuencia de resonancia es:

$$N_{res} = \frac{60*\lambda^2}{2\pi*L_c^2} \sqrt{\frac{E*I*g}{\gamma*A}} * \alpha = \frac{60*(3.926)^2}{2\pi*550^2} \sqrt{\frac{2.06\times10^5 * \frac{\pi}{64} * 14^4 * 9810}{7.7\times10^{-5} * \frac{\pi}{4} * 14^2}} * 0.5 = 6988 \text{ rpm} \quad (13)$$

3. Velocidad de Rotación admisible según valor del diámetro Nominal

La velocidad crítica también está limitada por una relación Dn-N, el cual es el límite de la velocidad periférica de un tornillo de bolas. En este caso, el diámetro utilizado corresponde a la distancia entre centros de los elementos rodantes situados diametralmente opuestos. A saber:

$$N_2 * D \leq 70000 \Rightarrow N_2 = \frac{70000}{D} = \frac{70000}{16.75} = 4179 \text{ rpm} \quad (14)$$

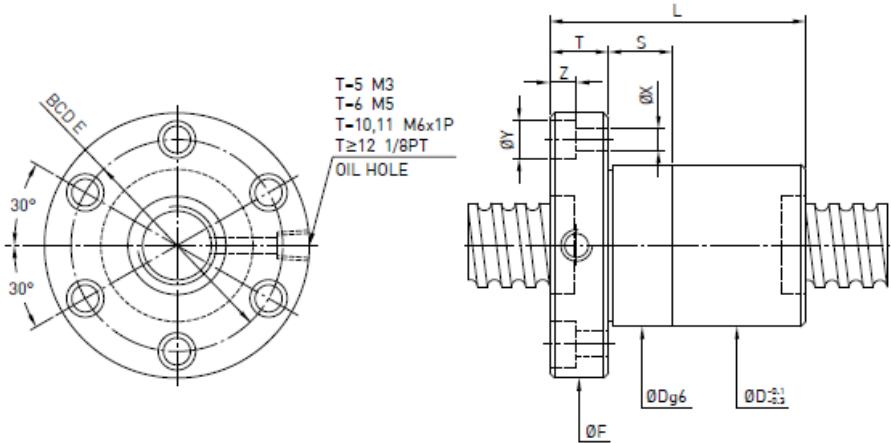
De esta manera, tanto la frecuencia de resonancia y la velocidad según Dn-N se encuentran alejadas de la máxima velocidad de rotación operativa N_{max} , garantizando un funcionamiento correcto del husillo en todo momento.

4.2.1.3 Justificación de la Nuez, dirección en Z

4.2.1.3.1 Selección del número de modelo de la Nuez

Dada las posibilidades de compra que ofrece el mercado, además de la restricción presupuestaria. Se realizó un estudio del catálogo HIWIN de tornillos de potencia y, en consecuencia, se selecciona la nuez tipo FSI, modelo 16-5T3. La Tabla 4-3 muestra un extracto del catálogo con las principales propiedades de esta nuez. Se destacan los siguientes parámetros:

- Carga estática, $C_o = 1331 \text{ kgf}$
- Carga Dinámica, $C = 731 \text{ kgf}$



Model	Size		Ball Dia.	PCD	RD	Circuits	Stiffness kgf / μm K	Dynamic Load 1x10 ⁶ revs C [kgf]	Static Load Co [kgf]			Flange				Bolt		Fit
	Nominal Dia.	Lead								D	L	F	T	BCD-E	X	Y	Z	
8-2.5T3	8	2.5	1.500	8.2	6.652	3	8	170	267	18	28	35	5	27	4.5	0	0	0
14-2.54T3	14	2.54	2.000	14.2	12.136	3	12	339	655	30	39	50	10.6	40	5	7	5	0
14-4T3		4		14.2	12.136	3	12	339	655	26	33	48	6	36	5.5	0	0	0
16-2T3		2	1.500	16.2	14.652	3	14	252	593	27	36	44	10	34	4.5	8	4.5	0
16-2.5T4		2.5		16.2	14.652	4	19	358	862	27	44	44	10	34	4.5	8	4.5	12
16-5T3	16	5	16.6	13.324	3	11	731	1331	30	46	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12	
16-514			3.1/5	16.6	13.324	4	12	936	1775	30	52	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12

Figura 4-4 Principales propiedades de la nuez seleccionada. Fuente: Extracto de catálogo HIWIN

Como se ve, esta nuez cumple con las restricciones de paso, así como las de diámetro nominal. A continuación, se procede a validar este elemento a través de su carga estática admisible.

4.2.1.3.2 Estudio de la carga axial admisible

Asumiendo que el subsistema es perturbado por una carga durante su aceleración y su desaceleración, y usando un factor de seguridad estática, $f_s = 2$, se tiene que:

$$F_{aMax} = \frac{C_0 a}{f_s} = \frac{1331}{2} = 665.5 [kgf] = 6528.6[N] \quad (15)$$

Así, la carga axial permisible es mucho mayor que la máxima carga axial aplicada, $F_{aMax} = 152.1 [N]$. Por lo tanto, no existirán problemas usando este modelo.

4.2.1.3.3 Estudio de la vida útil de servicio

1. Cálculo de las distancias de desplazamiento

Los parámetros empleados para este cálculo se muestran a continuación:

Máxima Velocidad, v_{max}	0.07 m/s
Tiempo de Aceleración, t_1	0.2s
Tiempo de Desaceleración, t_2	0.2s
• Distancia de desplazamiento durante la aceleración	

$$l_{1-4} = \frac{v_{max} * t_1}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7mm \quad (16)$$

- Distancia de desplazamiento en movimiento uniforme

$$l_{2-5} = l_s - \frac{v_{max} * t_1 + v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = 400 - \frac{0.07 * 0.2 + 0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 486mm \quad (17)$$

- Distancia de desplazamiento en desaceleración

$$l_{3-6} = \frac{v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7mm \quad (18)$$

La Tabla 4-2 Resume los valores obtenidos del tramo asociado a cada una de las fuerzas presentes a lo largo de la carrera.

Tabla 4-2 Cuadro Resumen de las distancias de cada fuerza existente. Fuente: Elaboración personal

Movimiento	Fuerza implicada $F_{aN}[N]$	Recorrido $l_N[mm]$
1.Durante Aceleración en Subida	152.1	7
2.Durante Subida Uniforme	147.5	386
3.Durante Desaceleración en Subida	143	7
4.Durante Aceleración en Bajada	103	7
5.Durante Bajada Uniforme	107.5	386
6.Durante Desaceleración en Bajada	112.1	7

2. Carga Axial Promedio

A partir de los datos resumidos en la Tabla 4-2 se calcula la carga axial promedio del desplazamiento en z. A saber:

$$F_M = \frac{1}{\sqrt[3]{2 \times l_s}} (F_{a1}^3 \times l_1 + F_{a2}^3 \times l_2 + F_{a3}^3 \times l_3 + F_{a4}^3 \times l_4 + F_{a5}^3 \times l_5 + F_{a6}^3 \times l_6) = 130.57 [N] \quad (19)$$

3. Vida Nominal

Para calcular la vida nominal del husillo, es necesario considerar los siguientes parámetros:

La vida nominal L, se calcula a partir de la siguiente expresión:

Número de reciprocaciones por minuto,	5 rpm
n	
Carrera, l_s	600mm
Paso, Ph	5mm
Factor de carga, f_w	1.5
$L = \left(\frac{C_a}{f_w F_m}\right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{731 * 9.81}{1.5 * 130.57}\right)^3 \times 10^6 = 4.9 \times 10^{10} \text{ rpm}$	(20)

4. Revoluciones por minuto promedio

Las revoluciones por minuto promedio se calculan mediante la expresión mostrada a continuación:

$$N_M = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = \frac{2 * 5 * 400}{5} = 800 \text{ rpm} \quad (21)$$

5. Cálculo del tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal

En consecuencia, el tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal es:

$$L_h = \frac{L}{60 * N_M} = \frac{4.9 \times 10^{10}}{60 * 800} = 1020833 \text{ hr} \quad (22)$$

6. Cálculo de la distancia de desplazamiento de vida útil de servicio según la Vida Nominal

El valor anterior también puede ser expresado en unidades de distancia, el cual es:

$$L_s = L * Ph * 10^{-6} = 245000 \text{ km} \quad (23)$$

En síntesis, considerando todos los parámetros calculados anteriormente, el modelo FSI-16-5T3 satisface con holgura los requerimientos impuestos de 7680 horas de servicio.

4.2.1.4 Estudio del Torque Rotacional

Como en el estudio de las fuerzas axiales presentes en cada etapa del desplazamiento a lo largo del husillo, los pares de torsión pueden ser divididos en las mismas seis etapas. Cada uno de estos torques tiene tres componentes: el torque que se genera a partir de la fricción de los elementos mecánicos involucrados, el torque necesario para la aceleración del conjunto motor-componentes mecánicos-husillo (cargas externas) y un torque que aparece cuando existen precargas en la nuez, el cual es nulo para efectos de este estudio.

4.2.1.4.1 Torque de fricción debido a cargas externas

En la práctica, se distinguen dos tipos de torques debido a la fricción, uno que se produce con la subida uniforme (T_1) y el otro con la bajada uniforme (T_2). Matemáticamente:

$$T_1 = \frac{F_{a2} * Ph}{2 * \pi * \eta} = \frac{152.1 * 5}{2 * \pi * 0.9} = 134.5 [Nmm] \quad (24)$$

$$T_2 = \frac{F_{a5} * Ph}{2 * \pi * \eta} = \frac{107.5 * 5}{2 * \pi * 0.9} = 95.1 [Nmm] \quad (25)$$

Donde η corresponde a un factor asociado al coeficiente de fricción (estimativo).

4.2.1.4.2 Torque debido a precargas existentes en el husillo

No aplica para este caso, debido a que el modelo preseleccionado no contempla la existencia de precargas dentro de la nuez.

4.2.1.4.3 Torque necesario para la aceleración

Para determinar los torques asociados a los movimientos acelerados previamente es necesario obtener los momentos de inercia tanto del motor como de las cargas externas. De algunas referencias se tiene que aproximadamente el momento inercial por unidad de largo del husillo es $3.9 \times 10^{-4} [\frac{kgcm^2}{mm}]$. En consecuencia, para un largo total aproximado de 600mm se tiene:

$$J_s = 3.9 \times 10^{-4} * 600 = 0.234 Kgm^2 = 0.234 \times 10^{-4} [kgm^2] \quad (26)$$

Ahora, considerando el momento de inercia que entregan los elementos mecánicos, se tiene:

$$\begin{aligned} J &= (m_e + m_b) \left(\frac{Ph}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + J_s = (11 + 2) \left(\frac{5}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + 0.234 \times 10^{-4} \\ &= 3.16 \times 10^{-5} [kgm^2] \end{aligned} \quad (27)$$

En paralelo, la aceleración angular se calcula a partir de la expresión:

$$\omega' = \frac{2\pi N_{Max}}{60 * t} = \frac{2\pi * 800}{60 * 0.2} = 419 [\frac{rad}{s^2}] \quad (28)$$

Si se considera que el momento de inercia del motor empleado para este desplazamiento en z tiene un valor de $J_m = 4 \times 10^{-4} [kgm^2]$ (dato del fabricante), finalmente se obtiene que el torque requerido para la aceleración de las cargas externas es:

$$T_3 = (J + J_m) * \omega' = (3.16 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-4}) * 419 = 0.18 \text{ Nm} = 180 \text{ Nmm} \quad (29)$$

De esta manera, es posible identificar los torques en las seis fases de movimiento a lo largo del husillo:

Durante la aceleración en subida:

$$T_{k1} = T_1 + T_3 = 314.5[\text{Nmm}] \quad (30)$$

Durante el movimiento uniforme en subida:

$$T_{t1} = T_1 = 134.5[\text{Nmm}] \quad (31)$$

Durante desaceleración en subida:

$$T_{g1} = T_1 - T_3 = -45.5[\text{Nmm}] \quad (32)$$

Durante aceleración en bajada:

$$T_{k2} = T_2 + T_3 = 275.1[\text{Nmm}] \quad (33)$$

Durante el movimiento uniforme en bajada:

$$T_{t2} = T_2 = 95.1[\text{Nmm}] \quad (34)$$

Durante desaceleración en bajada:

$$T_{g2} = T_2 - T_3 = -84.9[\text{Nmm}] \quad (35)$$

4.2.1.5 Justificación del Motor

4.2.1.5.1 Velocidad de rotación

Dado que el husillo ha sido seleccionado en base a la tasa de velocidad rotacional del motor, es innecesario realizar cálculos sobre este.

4.2.1.5.2 Torque requerido para el motor

Del estudio realizado previamente, es posible determinar cuál es el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento vertical del extrusor, el cual se encuentra en la aceleración de subida ($T_{max} = T_{k1} = 314.5$ [Nmm]). En este caso, el motor es capaz de satisfacer con suficiente holgura dicho requerimiento.

4.2.2 Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en Z

Los rieles serán montados como lo muestra la Figura 4-5, a excepción de que solo se instalarán bloques en los puntos 1 y 2 mostrados en la figura.

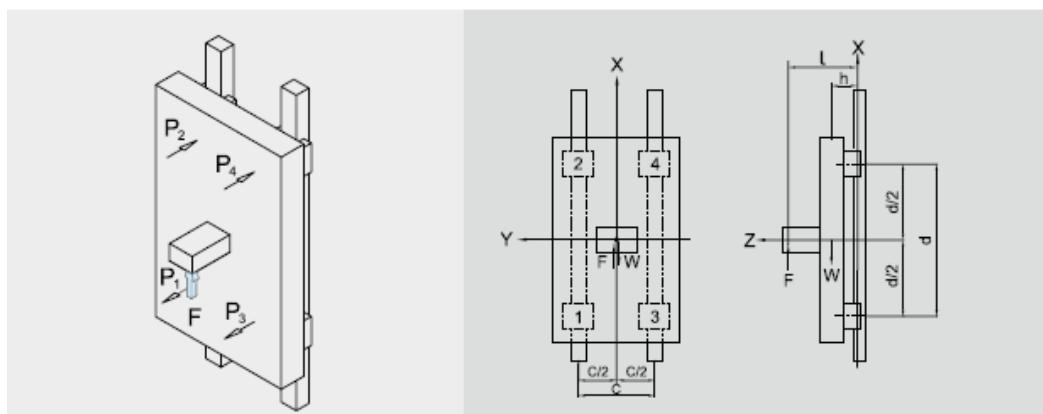


Figura 4-5 Montaje de las guías lineales para el desplazamiento en z. Fuente: Extracto de catálogo HIWIN

Como se vio en el estudio previo del husillo, la fuerza de mayor magnitud se presenta en la aceleración durante la subida, por lo que es esta carga que se utilizará para efectos de la justificación de las guías lineales. Los valores de cada constante mostrados en la Figura 4-5, aplicado al caso del desplazamiento en Z son los siguientes:

F:	152.1[N]
W:	2 [kg]
l:	60[mm]
h:	40[mm]
d:	80[mm]
c:	84[mm]

La carga equivalente que incide en cada bloque es de la misma magnitud, pero de sentido contrario entre ellos, calculada a continuación:

$$P_1 \sim P_2 = \left| +\frac{Wgh}{2d} - \frac{Fl}{2d} \right| = \left| +\frac{2 * 9.81 * 40}{2 * 80} - \frac{152.1 * 60}{2 * 80} \right| = |-52.13| [N] \quad (36)$$

$$= |-0.052| [kN]$$

$$P_1 = 0.052 \text{ [kN]} ; P_1 = -0.052 \text{ [kN]} \quad (37)$$

Debido a que no se contemplan precargas en los bloques, estas fuerzas calculadas serán consideradas como las cargas máximas. Dada la baja magnitud, y entendiendo las disponibilidades reales del mercado, se selecciona la guía lineal del fabricante HIWIN, modelo N° HGW-15CC. La Figura 4-6 muestra los principales parámetros de la guía lineal preseleccionada.

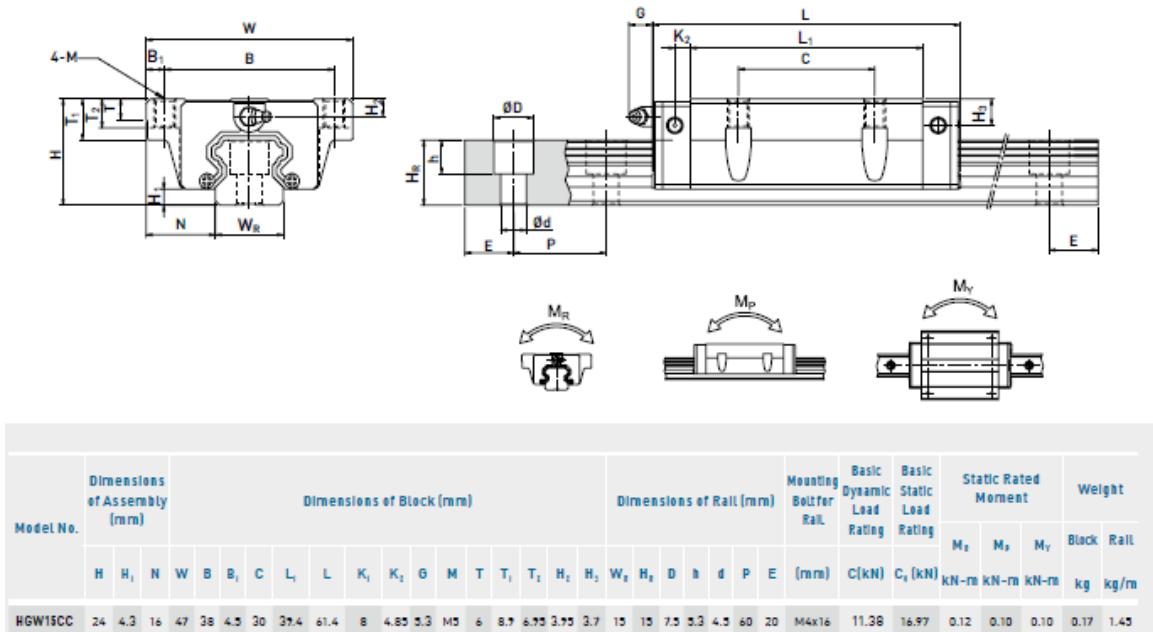


Figura 4-6 Guía Lineal preseleccionada. Fuente: Extracto de catálogo HIWIN

Se destacan a continuación las propiedades de cargas y momentos admisibles para el modelo preseleccionado. En este caso el momento de interés es el de “cabeceo” que es el de mayor magnitud que recibe en la práctica.

Carga dinámica, C [kN]	11.38
Carga estática, C_0 [kN]	16.97
Momento estático, M_p [kNm]	0.10

4.2.2.1 Factor de Seguridad estático

Considerando los cálculos de carga y momento, es posible contrastarlos con los valores admisibles mediante la ecuación de factor de seguridad estática (f_{SL} para la carga, f_{SM} para el momento). Para estos cálculos, se entiende como suficientemente aceptables factores de seguridad por sobre 3, para ambos casos:

$$f_{SL} = \frac{C}{P} = \frac{16.97}{0.052} = 326.3 > 3.0 \quad (38)$$

$$f_{SM} = \frac{M_0}{M} = \frac{0.10}{0.008} = 12.5 > 3.0 \quad (39)$$

Vemos que en estos casos se supera con holgura los factores de seguridad impuestos.

4.2.2.2 Vida nominal

Para calcular la vida nominal, es necesario considerar un factor de carga, f_w cuyo valor sugerido por el fabricante es de 1.2 para velocidades de operación bajas. El cálculo de L permite predecir la distancia total que recorrerá un bloque con una confiabilidad del 90%.

$$L = \left(\frac{C_0}{f_w * P} \right)^3 \times 50 \text{ km} = \left(\frac{11.38}{1.2 * 0.131} \right)^3 \times 50 = 18968700 \text{ km} \quad (40)$$

En este caso, fue utilizada la carga dinámica promedio obtenida en la ecuación (19) así como la carga dinámica admisible característica del modelo de la guía lineal.

4.2.2.3 Vida nominal de servicio

Asimismo, es posible interpretar la vida nominal en función de las horas de operación, usando la máxima velocidad de servicio por medio de la siguiente expresión:

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{v_e * 60} = \frac{18968700 \times 10^3}{0.07 * 60 * 60} = 75272900 \text{ hr} \quad (41)$$

En síntesis, la guía lineal HIWIN modelo HGW-15CC satisface los requerimientos solicitados para el desplazamiento en z tanto para las horas de operación, cargas estáticas admisibles y momentos admisibles.

4.2.3 Justificación husillo de desplazamiento en x

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el subsistema en estudio. En este caso corresponde al desplazamiento en el eje x. El cual consiste en el husillo y dos rieles con un bloque cada uno, impulsado por transmisión directa por un motor *stepper*, a través de un acople simple.

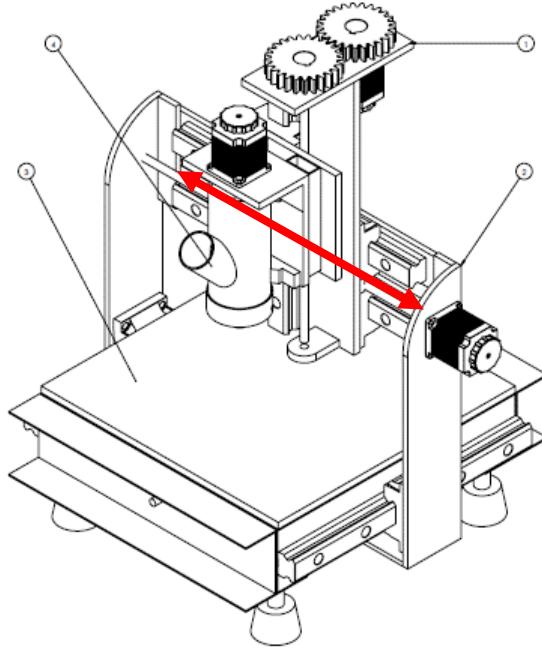


Figura 4-7 Esquema del desplazamiento en X. Fuente: Elaboración personal

4.2.3.1 Parámetros de Diseño

A continuación (Tabla 4-3), se presentan los parámetros de diseño, de los cuales se obtendrán los requerimientos tanto del husillo como del motor *stepper*.

Tabla 4-3 Resumen de los parámetros de diseño, desplazamiento en x. Fuente: Elaboración personal

Parámetro	Valor
Masa Trabajo (incluido el concreto)	$m_t = 32 \text{ kg}$
Masa Portablockes	$m_p = 3 \text{ kg}$
Largo Carrera	$l_s = 500\text{mm}$
Precisión	$p = 0.05 \text{ mm}$
Velocidad Máxima	$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$
Tiempo de Aceleración (aproximado)	$t_1 = 0.2 \text{ s}$
Tiempo de Desaceleración (aproximado)	$t_2 = 0.2 \text{ s}$
Número de Reciprocaciones por minuto (aproximado)	$n = 5 \text{ rpm}$
Vida útil de servicio requerida	7680hr
Motor	AC Servo, 6000 rpm máximo
Momento de Inercia del Motor	$J_m = 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
Reducción	Ninguna (sistema de engranajes 1:1)
Coeficiente de Fricción del sistema bloque/riel (aproximado)	$\mu = 0.003$ (<i>rolido, cada riel</i>)
Resistencia superficial del sistema bloque/riel (aproximado)	$f = 20 \text{ N}$ (<i>sin carga, cada riel</i>)

4.2.3.2 Justificación del Husillo, dirección en x

4.2.3.2.1 Suposición del largo total del husillo

El largo de la carrera considerado como parámetro de diseño para el movimiento horizontal es de 400mm, por lo que, al considerar el espesor de la nuez, además de su elemento sostenedor se optará por un largo de final de 500mm. Sin embargo, debido a que los husillos encontrados en el mercado suelen venir con el hilo en todo el largo del eje, se debe considerar espacio para el mecanizado de los extremos. En consecuencia, un husillo de al menos 600mm es necesario para el desplazamiento horizontal.

4.2.3.2.2 Selección del tipo de montaje del husillo

Dado que se asume una carrera de 500mm de largo para el husillo, además de una velocidad máxima de 0.07 m/s. Se opta por una configuración de montaje del tipo fijo-libre en los extremos. Se descarta la opción fijo-fijo debido a su complejidad estructural y a las altas precisiones requeridas en su instalación.

4.2.3.2.3 Selección del paso del husillo

Se requiere una precisión de 0.05 mm para la extrusión de concreto. Por otro lado, el motor a disposición tiene una capacidad de desplazarse 1.8° por pulso, lo que permite 200 ángulos posibles dentro de una vuelta completa.

Considerando las capacidades del motor *stepper*, un husillo de 10mm de paso bastaría para satisfacer la precisión requerida. Sin embargo, dada la disponibilidad del mercado estudiada en la etapa conceptual, es más común encontrar husillos de 5mm de paso, lo que entrega una precisión de 0.025mm. En consecuencia, se buscará un husillo con estas características.

4.2.3.2.4 Estudio de las cargas axiales admisibles.

1. Cálculo de la máxima carga axial:

Se identifican 6 tipos de fuerzas axiales diferentes dependiendo de si el desplazamiento se está realizando hacia la izquierda del observador, o bien hacia su derecha, además de la fase en la que se encuentra dicho desplazamiento (aceleración, uniforme o desaceleración). A continuación, se muestran los parámetros de diseño que participan en el estudio de las diferentes cargas aplicadas a lo largo del husillo:

Resistencia superficial de las guías

$$f = 20 \text{ N (sin carga, cada uno)}$$

Masa del extrusor

$$m_t = 32 \text{ kg}$$

Masa Portablockes

$$m_p = 3 \text{ kg}$$

Velocidad máxima

$$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$$

Tiempo de aceleración

$$t_1 = 0.2 \text{ s}$$

Coeficiente de Roce de las guías

$$\mu = 0.003 \text{ (cada uno)}$$

A partir de los parámetros de diseño impuestos, se obtiene la aceleración:

$$\alpha = \frac{v_{max}}{t_1} = 0.35 \text{ m/s}^2 \quad (42)$$

En consecuencia, las distintas cargas que aparecen en cada una de las fases son:

- Durante la aceleración hacia la derecha:

$$F_{a1} = 2\mu(m_t + m_p)g + (m_t + m_p)\alpha + 2f = 54.31[N] \quad (43)$$

- Durante el movimiento uniforme hacia la derecha:

$$F_{a2} = 2\mu(m_t + m_p)g + 2f = 42.06[N] \quad (44)$$

- Durante desaceleración hacia la derecha:

$$F_{a3} = 2\mu(m_t + m_p)g - (m_t + m_p)\alpha + 2f = 29.81[N] \quad (45)$$

- Durante aceleración hacia la izquierda:

$$F_{a4} = -2\mu(m_t + m_p)g - (m_t + m_p)\alpha - 2f = -54.31[N] \quad (46)$$

- Durante el movimiento uniforme hacia la izquierda:

$$F_{a5} = -2\mu(m_t + m_p)g - 2f = -42.06[N] \quad (47)$$

- Durante desaceleración hacia la izquierda:

$$F_{a6} = -2\mu(m_t + m_p)g + (m_t + m_p)\alpha - 2f = -29.81[N] \quad (48)$$

En consecuencia, la mayor carga ocurre durante la aceleración hacia la derecha y su valor es de $F_{aMax} = F_{a1} = 54.31 [N]$.

2. Carga crítica de pandeo en el husillo:

Según la fórmula de Euler, la carga crítica, P_{crit} que produce pandeo en elementos de características comprimidas y esbeltas está dada por:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2 EI}{L_z} \quad (49)$$

Donde:

- E : Modulo de Young (2.06×10^5 [$\frac{N}{mm^2}$]).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64} d^4$).
- L_z : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_z = 550mm$).
- $n=2$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).

Para este cálculo, se asume un diámetro de raíz de 14mm, además de una distancia entre los puntos de pontaje de aproximadamente 550 mm. De esta manera, se tiene como carga crítica:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2 EI}{L_z^2} = \frac{2 * \pi^2 * 2.06 \times 10^5 * \frac{\pi}{64} * (14)^4}{550^2} = 25400[N] \quad (50)$$

3. Cargas de Tracción/Compresión admisibles para el husillo

La carga límite para que el husillo no falle por fluencia está dada por la siguiente ecuación, donde σ_{cr} es el límite de fluencia característico del material. Nuevamente se asume un diámetro de 14mm:

$$P_2 = \sigma_{cr} A = 147 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{\pi}{4} 14[mm]^2 = 22629[N] \quad (51)$$

En conclusión, tanto la carga crítica para evitar pandeo, como la carga crítica para la falla por fluencia están por sobre las cargas operativas del desplazamiento en x. En consecuencia, un husillo de estas características geométricas operará sin mayores complicaciones.

4.2.3.3 Estudio de la velocidad de rotación admisible

1. Máxima velocidad de Rotación

El estudio de la máxima velocidad de rotación que tendrá el husillo implica la utilización de los siguientes parámetros:

Diámetro del tornillo, d_t	16mm
Paso, Ph	5mm
Máxima Velocidad, v_{max}	$0.07 \frac{m}{s}$

De esta manera, la velocidad de rotación máxima es:

$$N_{max} = \frac{v_{max} * 60 * 10^3}{Ph} = \frac{0.07 * 60 * 10^3}{5} = 840 \text{ rpm} \quad (52)$$

2. Velocidad de Rotación de resonancia del husillo

Es necesario analizar el número de revoluciones por minuto para el cual el husillo en cuestión entra en resonancia. Dicha velocidad crítica viene dada por:

$$N_{res} = \frac{60 * \lambda^2}{2\pi * L_c^2} \sqrt{\frac{E * I * g}{\gamma * A}} * \alpha \quad (53)$$

Donde:

- E : Modulo de Young ($2.06 \times 10^5 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64} d^4$).
- L_c : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_c = 550mm$).
- $\lambda = 3.926$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).
- $g = 9.81$ aceleración de gravedad
- A es el área de la sección del husillo ($\frac{\pi}{4} d^2$).
- $\alpha = 0.5$
- $\gamma = 7.7 \times 10^{-5} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ la gravedad específica

En consecuencia, el valor de la frecuencia de resonancia es:

$$N_{res} = \frac{60 * \lambda^2}{2\pi * L_c^2} \sqrt{\frac{E * I * g}{\gamma * A}} * \alpha = \frac{60 * (3.926)^2}{2\pi * 550^2} \sqrt{\frac{2.06 \times 10^5 * \frac{\pi}{64} * 14^4 * 9810}{7.7 \times 10^{-5} * \frac{\pi}{4} * 14^2}} * 0.5 = 6988 \text{ rpm} \quad (54)$$

3. Velocidad de Rotación admisible según valor del diámetro Nominal

La velocidad crítica también está limitada por una relación Dn-N, el cual es el límite de la velocidad periférica de un tornillo de bolas. En este caso, el diámetro utilizado corresponde a la distancia entre centros de los elementos rodantes situados diametralmente opuestos. A saber:

$$N_2 * D \leq 70000 \Rightarrow N_2 = \frac{70000}{D} = \frac{70000}{16.75} = 4179 \text{ rpm} \quad (55)$$

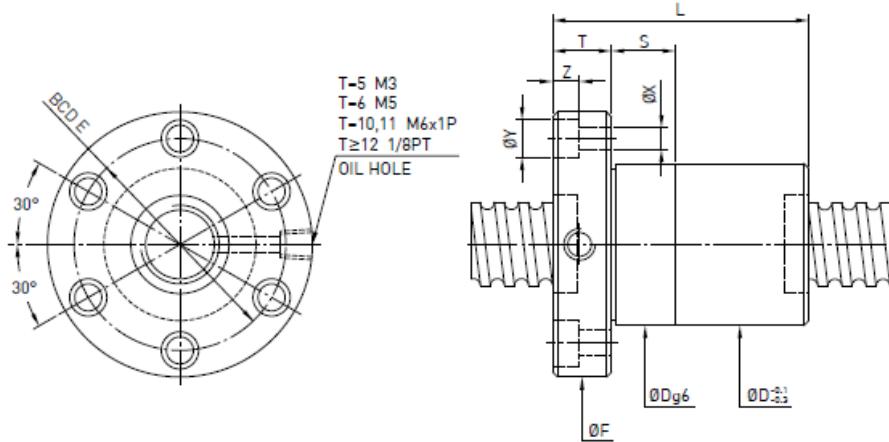
De esta manera, tanto la frecuencia de resonancia y la velocidad según Dn-N se encuentran alejadas de la máxima velocidad de rotación operativa N_{max} , garantizando un funcionamiento correcto del husillo en todo momento.

4.2.4 Justificación de la Nuez, dirección en X

4.2.4.1 Selección del número de modelo de la Nuez

Dada las posibilidades de compra que ofrece el mercado, además de la restricción presupuestaria. Se realizó un estudio del catálogo HIWIN de tornillos de potencia y, en consecuencia, se selecciona la nuez tipo FSI, modelo 16-5T3. La Figura 4-8 muestra un extracto del catálogo con las principales propiedades de esta nuez. Se destacan los siguientes parámetros:

- Carga estática, $C_o = 1331 \text{ kgf}$
- Carga Dinámica, $C = 731 \text{ kgf}$



Model	Size		Ball Dia.	PCD	RD	Circuits	Stiffness kgf / μm K	Dynamic Load 1x10 ⁶ revs C (kgf)	Static Load Co (kgf)			Flange			Bolt			Fit	
	Nominal Dia.	Lead								D	L	F	T	BCD-E	X	Y	Z		
8-2.5T3	8	2.5	1.500	8.2	6.652	3	8	170	267	18	28	35	5	27	4.5	0	0	0	
14-2.54T3	14	2.54	2.000	14.2	12.136	3	12	339	655	30	39	50	10.6	40	5	7	5	0	
14-4T3		4													5.5	0	0	0	
16-2T3		2		1.500	16.2	14.652	3	14	252	593	27	36	44	10	34	4.5	8	4.5	0
16-2.5T4		2.5			16.2	14.652	4	19	358	862	27	44	44	10	34	4.5	8	4.5	12
16-5T3	16	5		16.6	13.324	3	11	731	1331	30	46	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12	
16-5T4		3.175	16.6	13.324	4	12	936	1775	30	52	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12		

Figura 4-8 Principales propiedades de la nuez seleccionada. Fuente: Extracto del catálogo HIWIN de husillos

Como se ve, esta nuez cumple con las restricciones de paso, así como las de diámetro nominal. A continuación, se procede a validar este elemento a través de su carga estática admisible.

4.2.4.2 Estudio de la carga axial admisible

Asumiendo que el subsistema es perturbado por una carga durante su aceleración y su desaceleración, y usando un factor de seguridad estática, $f_s = 2$, se tiene que:

$$F_{amax} = \frac{C_0 a}{f_s} = \frac{1331}{2} = 665.5 \text{ [kgf]} = 6528.6[N] \quad (56)$$

Así, la carga axial permisible es mucho mayor que la máxima carga axial aplicada, $F_{aMax} = 54.31 [N]$. Por lo tanto, no existirán problemas usando este modelo.

4.2.4.3 Estudio de la vida útil de servicio

1. Cálculo de las distancias de desplazamiento

Los parámetros empleados para este cálculo se muestran a continuación:

$$\text{Máxima Velocidad, } v_{max} \quad 0.07 \text{ m/s}$$

$$\text{Tiempo de Aceleración, } t_1 \quad 0.2\text{s}$$

$$\text{Tiempo de Desaceleración, } t_2 \quad 0.2\text{s}$$

- Distancia de desplazamiento durante la aceleración

$$l_{1-4} = \frac{v_{max} * t_1}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7\text{mm} \quad (57)$$

- Distancia de desplazamiento en movimiento uniforme

$$l_{2-5} = l_s - \frac{v_{max} * t_1 + v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = 400 - \frac{0.07 * 0.2 + 0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 486\text{mm} \quad (58)$$

- Distancia de desplazamiento en desaceleración

$$l_{3-6} = \frac{v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7\text{mm} \quad (59)$$

La Tabla 4-4 Resume los valores obtenidos del tramo asociado a cada una de las fuerzas presentes a lo largo de la carrera.

Tabla 4-4 Cuadro Resumen de las distancias de cada fuerza existente.

Movimiento	Fuerza implicada $F_{aN}[N]$	Recorrido $l_N[\text{mm}]$
1.Durante Aceleración en Subida	54.31	7
2.Durante Subida Uniforme	42.06	386
3.Durante Desaceleración en Subida	29.81	7
4.Durante Aceleración en Bajada	-54.31	7
5.Durante Bajada Uniforme	-42.06	386
6.Durante Desaceleración en Bajada	-29.81	7

2. Carga Axial Promedio

A partir de los datos resumidos en la Tabla 4-4 se calcula la carga axial promedio del desplazamiento en x. Como las cargas son simétricas en ambas direcciones, solo se considerarán las de un solo sentido, entendiéndose que la carga promedio del sentido contrario es igual, pero del signo opuesto Esto es:

$$F_{Mder} = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \times l_s} (F_{a1}^3 \times l_1 + F_{a2}^3 \times l_2 + F_{a3}^3 \times l_3)} = 33.48 [N] \quad (60)$$

3. Vida Nominal

Para calcular la vida nominal del husillo, es necesario considerar los siguientes parámetros:

Número de reciprocaciones por minuto, 5 rpm

n

Carrera, l_s 600mm

Paso, Ph 5mm

Factor de carga, f_w 1.5

La vida nominal L, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$L = \left(\frac{C_a}{f_w F_{Mder}} \right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{731 * 9.81}{1.5 * 33.48} \right)^3 \times 10^6 = 2.9 \times 10^{12} \text{ rpm} \quad (61)$$

4. Revoluciones por minuto promedio

Las revoluciones por minuto promedio se calculan mediante la expresión mostrada a continuación:

$$N_M = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = \frac{2 * 5 * 400}{5} = 800 \text{ rpm} \quad (62)$$

5. Cálculo del tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal

En consecuencia, el tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal es:

$$L_h = \frac{L}{60 * N_M} = \frac{2.9 \times 10^{12}}{60 * 800} = 60416000 \text{ hr} \quad (63)$$

6. Cálculo de la distancia de desplazamiento de vida útil de servicio según la Vida Nominal

El valor anterior también puede ser expresado en unidades de distancia, el cual es:

$$L_s = L * Ph * 10^{-6} = 14500000 \text{ Km} \quad (64)$$

En síntesis, considerando todos los parámetros calculados anteriormente, el modelo FSI-16-5T3 satisface con holgura los requerimientos impuestos de 7680 horas de servicio.

4.2.5 Estudio del Torque Rotacional

Como en el estudio de las fuerzas axiales presentes en cada etapa del desplazamiento a lo largo del husillo, los pares de torsión pueden ser divididos en las mismas seis etapas. Cada uno de estos torques tiene tres componentes: el torque que se genera a partir de la fricción de los elementos mecánicos involucrados, el torque necesario para la aceleración del conjunto motor-componentes mecánicos-husillo (cargas externas) y un torque que aparece cuando existen precargas en la nuez, el cual es nulo para efectos de este estudio.

4.2.5.1 Torque de fricción debido a cargas externas

El torque debido a la fricción se expresa matemáticamente como:

$$T_1 = \frac{F_{a2} * Ph}{2 * \pi * \eta} = \frac{54.31 * 5}{2 * \pi * 0.9} = 48.02 [Nmm] \quad (65)$$

Donde η corresponde a un factor asociado al coeficiente de fricción (estimativo).

4.2.5.2 Torque debido a precargas existentes en el husillo

No aplica para este caso, debido a que el modelo preseleccionado no contempla la existencia de precargas dentro de la nuez.

4.2.5.3 Torque necesario para la aceleración

Para determinar los torques asociados a los movimientos acelerados previamente es necesario obtener los momentos de inercia tanto del motor como de las cargas externas. De algunas referencias se tiene que aproximadamente el momento inercial por unidad de largo del husillo es $3.9 \times 10^{-4} [\frac{Kgcm^2}{mm}]$. En consecuencia, para un largo total aproximado de 600mm se tiene:

$$J_s = 3.9 \times 10^{-4} * 600 = 0.234 Kgm^2 = 0.234 \times 10^{-4} [Kgm^2] \quad (66)$$

Ahora, considerando el momento de inercia que entregan los elementos mecánicos, se tiene:

$$\begin{aligned} J &= (m_t + m_p) \left(\frac{Ph}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + J_s = (33 + 2) \left(\frac{5}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + 0.234 \times 10^{-4} \\ &= 4.56 \times 10^{-5} [Kgm^2] \end{aligned} \quad (67)$$

En paralelo, la aceleración angular se calcula a partir de la expresión:

$$\omega' = \frac{2\pi N_{Max}}{60 * t} = \frac{2\pi * 800}{60 * 0.2} = 419 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (68)$$

Si se considera que el momento de inercia del motor empleado para este desplazamiento en z tiene un valor de $J_m = 4 \times 10^{-4} [Kgm^2]$ (dato del fabricante), finalmente se obtiene que el torque requerido para la aceleración de las cargas externas es:

$$T_2 = (J + J_m) * \omega' = (4.56 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-4}) * 419 = 0.18 Nm = 180 Nmm \quad (69)$$

De esta manera, es posible identificar los torques en las seis fases de movimiento a lo largo del husillo. Dado que las cargas y los torques son simétricos para ambos sentidos, basta solo con calcular tres: durante la aceleración, durante el movimiento uniforme y durante la desaceleración:

Durante la aceleración:

$$T_k = T_1 + T_2 = 228.02 [Nmm] \quad (70)$$

Durante el movimiento uniforme:

$$T_t = T_1 = 48.02 [Nmm] \quad (71)$$

Durante desaceleración:

$$T_g = T_1 - T_2 = -131.98 [Nmm] \quad (72)$$

4.2.6 Justificación del Motor

4.2.6.1 Velocidad de rotación

Dado que el husillo ha sido seleccionado en base a la tasa de velocidad rotacional del motor, es innecesario realizar cálculos sobre este.

4.2.6.2 Torque requerido para el motor

Del estudio realizado previamente, es posible determinar cuál es el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento horizontal del extrusor, el cual se encuentra en la fase de aceleración ($T_{max} = T_k = 228.02 [Nmm]$). En este caso, el motor es capaz de satisfacer con suficiente holgura dicho requerimiento.

4.2.7 Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en X

Los rieles serán montados como lo muestra la Figura 4-9, a excepción de que por cada riel solamente pasará un bloque (1 y 3).

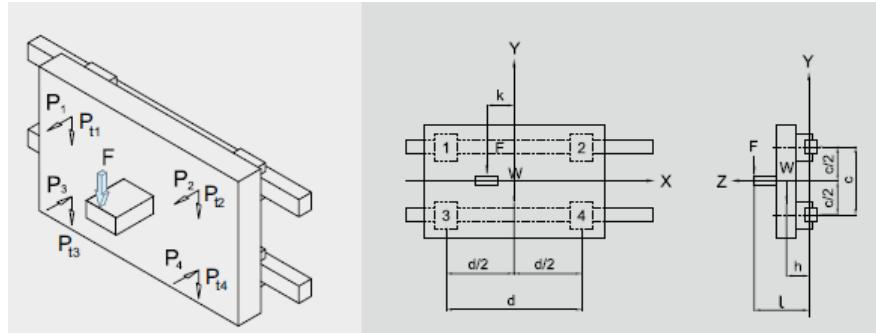


Figura 4-9 Montaje de las guías lineales para el desplazamiento en x e y. Fuente: Extracto de catálogo HIWIN

Como se vio en el estudio previo del husillo, la fuerza de mayor magnitud se presenta en la aceleración (independiente del sentido de esta), por lo que es esta carga que se utilizará para efectos de la justificación de las guías lineales. Los valores de cada constante mostrados en la Figura 4-9, aplicado al caso del desplazamiento en X son los siguientes:

F:	355[N]
W:	4.5 [kg]
l:	70[mm]
h:	30[mm]
c:	80[mm]

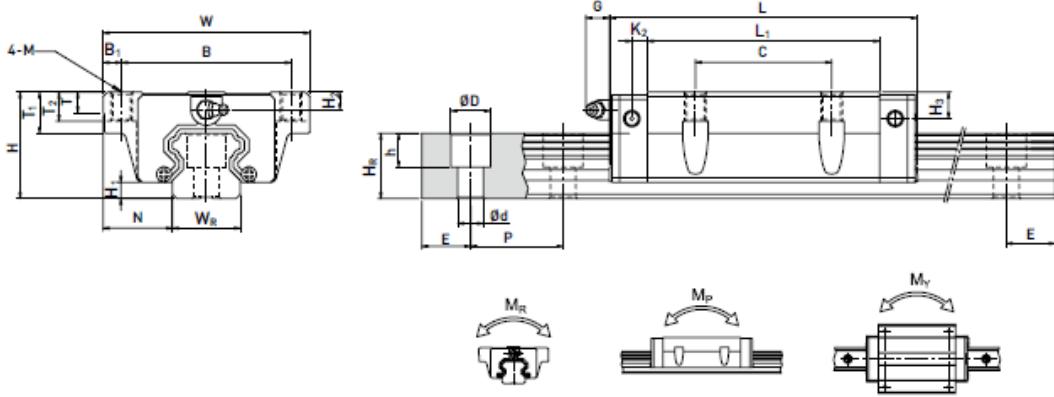
La carga equivalente que incide en cada bloque es de la misma magnitud, pero de sentido contrario entre ellos, calculada a continuación:

$$P_1 \sim P_3 = \left| -\frac{Wgh}{2c} - \frac{Fl}{2c} \right| = \left| -\frac{4.5 * 9.81 * 30}{2 * 80} - \frac{355 * 70}{2 * 80} \right| = \left| -163.6 \right| [N] \quad (73)$$

$$= \left| -0.164 \right| [kN]$$

$$P_1 = 0.164[kN]; P_1 = -0.164 [kN] \quad (74)$$

Debido a que no se contemplan precargas en los bloques, estas fuerzas calculadas serán consideradas como las cargas máximas. Dada la baja magnitud, y entendiendo las disponibilidades reales del mercado, se selecciona la guía lineal del fabricante HIWIN, modelo N° HGW-15CC. La Figura 4-10 muestra los principales parámetros de la guía lineal preseleccionada.



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)										Dimensions of Block (mm)						Dimensions of Rail (mm)						Mounting Bolts per Rail	Basic Dynamic Load Rating	Basic Static Load Rating	Static Rated Moment			Weight				
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	G	M	T	T ₁	H ₁	H ₂	W ₁	H ₃	D	b	d	P	E	[mm]	C _t (kN)	C _s (kN)	kg	kg/m				
	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.7	6.75	3.75	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45
HGW15CC	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.7	6.75	3.75	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45

Figura 4-10 Guía Lineal preseleccionada. Fuente: Extracto del catálogo HIWIN

Se destacan a continuación las propiedades de cargas y momentos admisibles para el modelo preseleccionado. En este caso el momento de interés es el de “cabeceo” que es el de mayor magnitud que recibe en la práctica.

$$\begin{aligned} \text{Carga dinámica, } C & [kN] & 11.38 \\ \text{Carga estática, } C_0 & [kN] & 16.97 \\ \text{Momento estático, } M_R & [\text{kNm}] & 0.12 \end{aligned}$$

4.2.7.1 Factor de Seguridad estático

Considerando los cálculos de carga y momento, es posible contrastarlos con los valores admisibles mediante la ecuación de factor de seguridad estática (f_{SL} para la carga, f_{SM} para el momento). Para estos cálculos, se entiende como suficientemente aceptables factores de seguridad por sobre 3, para ambos casos:

$$f_{SL} = \frac{C}{P} = \frac{16.97}{0.164} = 103.5 > 3.0 \quad (75)$$

$$f_{SM} = \frac{M_0}{M} = \frac{0.12}{0.026} = 4.5 > 3.0 \quad (76)$$

Vemos que en estos casos se supera los factores de seguridad impuestos.

4.2.7.2 Vida nominal

Para calcular la vida nominal, es necesario considerar un factor de carga, f_w cuyo valor sugerido por el fabricante es de 1.2 para velocidades de operación bajas. El cálculo

de L permite predecir la distancia total que recorrerá un bloque con una confiabilidad del 90%.

$$L = \left(\frac{C_0}{f_w * P} \right)^3 \times 50Km = \left(\frac{11.38}{1.2 * 0.164} \right)^3 \times 50 = 9667600 \text{ km} \quad (77)$$

En este caso, fue utilizada la carga dinámica promedio obtenida en la ecuación (74) así como la carga dinámica admisible característica del modelo de la guía lineal.

4.2.7.3 Vida nominal de servicio

Asimismo, es posible interpretar la vida nominal en función de las horas de operación, usando la máxima velocidad de servicio por medio de la siguiente expresión:

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{v_e * 60} = \frac{9667600 \times 10^3}{0.07 * 60 * 60} = 38363700 \text{ hr} \quad (78)$$

En síntesis, la guía lineal HIWIN modelo HGW-15CC satisface los requerimientos solicitados para el desplazamiento en z tanto para las horas de operación, cargas estáticas admisibles y momentos admisibles.

4.2.8 Justificación husillo de desplazamiento en y

La Figura 4-11 muestra el subsistema en estudio. En este caso corresponde al desplazamiento en el eje y. El cual consiste en el husillo y dos rieles con un bloque cada uno, impulsado por transmisión directa por un motor *stepper*, a través de un acople simple, situado al centro del puente.

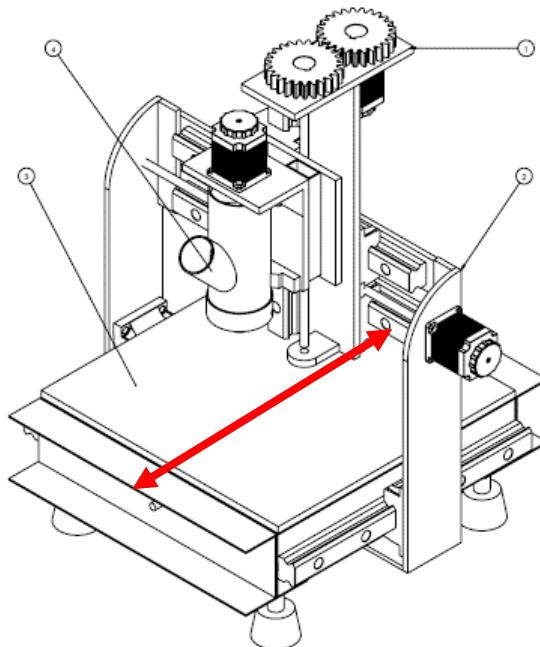


Figura 4-11 Esquema del desplazamiento en Y. Fuente: Elaboración Propia

4.2.8.1 Parámetros de Diseño

A continuación (Tabla 4-5), se presentan los parámetros de diseños, de los cuales se obtendrán los requerimientos tanto del husillo como del motor *stepper*.

Tabla 4-5 Resumen de los parámetros de diseño, desplazamiento en y. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Masa Puente (incluido el concreto)	$m_p = 58 \text{ kg}$
Masa Portanuez	$m_{pn} = 2 \text{ kg}$
Largo Carrera	$l_s = 500\text{mm}$
Precisión	$p = 0.05 \text{ mm}$
Velocidad Máxima	$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$
Tiempo de Aceleración (aproximado)	$t_1 = 0.2 \text{ s}$
Tiempo de Desaceleración (aproximado)	$t_2 = 0.2 \text{ s}$
Número de Reciprocaciones por minuto (aproximado)	$n = 5 \text{ rpm}$
Vida útil de servicio requerida	7680hr
Motor	AC Servo, 6000 rpm máximo
Momento de Inercia del Motor	$J_m = 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
Reducción	Ninguna (sistema de engranajes 1:1)
Coeficiente de Fricción del sistema bloque/riel (aproximado)	$\mu = 0.003$ (<i>rolido, cada riel</i>)
Resistencia superficial del sistema bloque/riel (aproximado)	$f = 20 \text{ N}$ (<i>sin carga, cada riel</i>)

4.2.8.2 Justificación del Husillo, dirección en y

4.2.8.2.1 Suposición del largo total del husillo

El largo de la carrera considerado como parámetro de diseño para el movimiento horizontal es de 400mm, por lo que, al considerar el espesor de la nuez, además de su elemento sostenedor se optará por un largo de final de 500mm. Sin embargo, debido a que los husillos encontrados en el mercado suelen venir con el hilo en todo el largo del eje, se debe considerar espacio para el mecanizado de los extremos. En consecuencia, un husillo de al menos 600mm es necesario para el desplazamiento horizontal.

4.2.8.2.2 Selección del tipo de montaje del husillo

Dado que se asume una carrera de 500mm de largo para el husillo, además de una velocidad máxima de 0.07 m/s. Se opta por una configuración de montaje del tipo fijo-libre en los extremos. Se descarta la opción fijo-fijo debido a su complejidad estructural y a las altas precisiones requeridas en su instalación.

4.2.8.2.3 Selección del paso del husillo

Se requiere una precisión de 0.05 mm para la extrusión de concreto. Por otro lado, el motor a disposición tiene una capacidad de desplazarse 1.8° por pulso, lo que permite 200 ángulos posibles dentro de una vuelta completa.

Considerando las capacidades del motor *stepper*, un husillo de 10mm de paso bastaría para satisfacer la precisión requerida. Sin embargo, dada la disponibilidad del mercado estudiada en la etapa conceptual, es más común encontrar husillos de 5mm de paso, lo que entrega una precisión de 0.025mm. En consecuencia, se buscará un husillo con estas características.

4.2.8.2.4 Estudio de las cargas axiales admisibles.

4. Cálculo de la máxima carga axial:

Se identifican 6 tipos de fuerzas axiales diferentes dependiendo de si el desplazamiento se está realizando hacia adelante o bien hacia atrás, además de la fase en la que se encuentra dicho desplazamiento (aceleración, uniforme o desaceleración). A continuación, se muestran los parámetros de diseño que participan en el estudio de las diferentes cargas aplicadas a lo largo del husillo:

Resistencia superficial de las guías	$f = 20 \text{ N}$ (<i>sin carga, cada uno</i>)
Masa del extrusor	$m_p = 58 \text{ kg}$
Masa Portablocos	$m_{pn} = 2 \text{ kg}$
Velocidad máxima	$v_{max} = 0.07 \text{ m/s}$
Tiempo de aceleración	$t_1 = 0.2 \text{ s}$
Coeficiente de Roce de las guías	$\mu = 0.003$ (<i>cada uno</i>)

A partir de los parámetros de diseño impuestos, se obtiene la aceleración:

$$\alpha = \frac{v_{max}}{t_1} = 0.35 \text{ m/s}^2 \quad (79)$$

En consecuencia, las distintas cargas que aparecen en cada una de las fases son:

- Durante la aceleración hacia adelante:

$$F_{a1} = 2\mu(m_p + m_{pn})g + (m_p + m_{pn})\alpha + 2f = 64.53[N] \quad (80)$$

- Durante el movimiento uniforme hacia adelante:

$$F_{a2} = 2\mu(m_p + m_{pn})g + 2f = 43.53[N] \quad (81)$$

- Durante desaceleración hacia adelante:

$$F_{a3} = 2\mu(m_p + m_{pn})g - (m_p + m_{pn})\alpha + 2f = 22.53[N] \quad (82)$$

- Durante aceleración hacia atrás:

$$F_{a4} = -2\mu(m_p + m_{pn})g - (m_p + m_{pn})\alpha - 2f = -64.53[N] \quad (83)$$

- Durante el movimiento uniforme hacia atrás:

$$F_{a5} = -2\mu(m_p + m_{pn})g - 2f = -43.53[N] \quad (84)$$

- Durante desaceleración hacia atrás:

$$F_{a6} = -2\mu(m_p + m_{pn})g + (m_p + m_{pn})\alpha - 2f = -22.53[N] \quad (85)$$

En consecuencia, la mayor carga ocurre durante la aceleración hacia la derecha y su valor es de $F_{aMax} = F_{a1} = 64.53 [N]$.

1. Carga crítica de pandeo en el husillo:

Según la fórmula de Euler, la carga crítica, P_{crit} que produce pandeo en elemento de características comprimidas y esbeltas está dada por:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2EI}{L_z} \quad (86)$$

Donde:

- E : Modulo de Young ($2.06 \times 10^5 [\frac{N}{mm^2}]$).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64}d^4$).
- L_z : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_z = 550mm$).
- $n=2$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).

Para este cálculo, se asume un diámetro de raíz de 14mm, además de una distancia entre los puntos de pontaje de aproximadamente 550 mm. De esta manera, se tiene como carga crítica:

$$P_{crit} = \frac{n\pi^2EI}{L_z^2} = \frac{2 * \pi^2 * 2.06 \times 10^5 * \frac{\pi}{64} * (14)^4}{550^2} = 25400[N] \quad (87)$$

2. Cargas de Tracción/Compresión admisibles para el husillo

La carga límite para que el husillo no falle por fluencia está dada por la siguiente ecuación, donde σ_{cr} es el límite de fluencia característico del material. Nuevamente se asume un diámetro de 14mm:

$$P_2 = \sigma_{cr}A = 147 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * \frac{\pi}{4} 14[mm]^2 = 22629[N] \quad (88)$$

En conclusión, tanto la carga crítica para evitar pandeo, como la carga crítica para la falla por fluencia están por sobre las cargas operativas del desplazamiento en y. En consecuencia, un husillo de estas características geométricas operará sin mayores complicaciones.

4.2.8.2.5 Estudio de la velocidad de rotación admisible

1. Máxima velocidad de Rotación

El estudio de la máxima velocidad de rotación que tendrá el husillo implica la utilización de los siguientes parámetros:

Diámetro del tornillo, d_t 16mm

Paso, Ph 5mm

Máxima Velocidad, v_{max} $0.07\frac{m}{s}$

De esta manera, la velocidad de rotación máxima es:

$$N_{max} = \frac{v_{max} * 60 * 10^3}{Ph} = \frac{0.07 * 60 * 10^3}{5} = 840 min^{-1} \quad (89)$$

2. Velocidad de Rotación de resonancia del husillo

Es necesario analizar el número de revoluciones por minuto para el cual el husillo en cuestión entra en resonancia. Dicha velocidad crítica viene dada por:

$$N_{res} = \frac{60 * \lambda^2}{2\pi * L_c^2} \sqrt{\frac{E * I * g}{\gamma * A}} * \alpha \quad (90)$$

Donde:

- E : Modulo de Young ($2.06 \times 10^5 [\frac{N}{mm^2}]$).
- I : Segundo momento de Área del husillo ($\frac{\pi}{64} d^4$).
- L_c : Distancia entre los dos puntos de montaje ($L_c = 550mm$).
- $\lambda = 3.926$ (Condición de borde Fijo-Apoyado).
- $g = 9.81$ aceleración de gravedad
- A es el área de la sección del husillo ($\frac{\pi}{4} d^2$).
- $\alpha = 0.5$

- $\gamma = 7.7 \times 10^{-5} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ la gravedad específica

En consecuencia, el valor de la frecuencia de resonancia es:

$$N_{res} = \frac{60*\lambda^2}{2\pi*L_c^2} \sqrt{\frac{E*I*g}{\gamma*A}} * \alpha = \frac{60*(3.926)^2}{2\pi*550^2} \sqrt{\frac{2.06 \times 10^5 * \frac{\pi}{64} * 14^4 * 9810}{7.7 \times 10^{-5} * \frac{\pi}{4} * 14^2}} * 0.5 = 6988 \text{ min}^{-1} \quad (91)$$

3. Velocidad de Rotación admisible según valor del diámetro Nominal

La velocidad crítica también está limitada por una relación Dn-N, el cual es el límite de la velocidad periférica de un tornillo de bolas. En este caso, el diámetro utilizado corresponde a la distancia entre centros de los elementos rodantes situados diametralmente opuestos. A saber:

$$N_2 * D \leq 70000 \Rightarrow N_2 = \frac{70000}{D} = \frac{70000}{16.75} = 4179 \text{ min}^{-1} \quad (92)$$

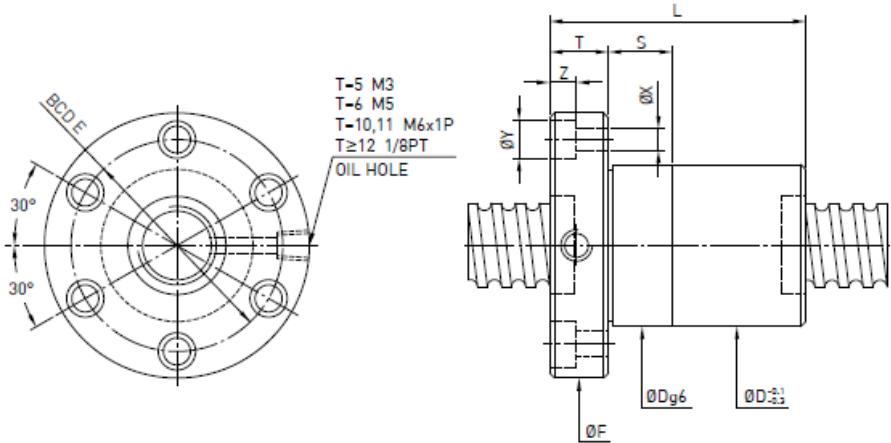
De esta manera, tanto la frecuencia de resonancia y la velocidad según Dn-N se encuentran alejadas de la máxima velocidad de rotación operativa N_{max} , garantizando un funcionamiento correcto del husillo en todo momento.

4.2.8.3 Justificación de la Nuez, dirección en Y

4.2.8.3.1 Selección del número de modelo de la Nuez

Dada las posibilidades de compra que ofrece el mercado, además de la restricción presupuestaria. Se realizó un estudio del catálogo HIWIN de tornillos de potencia y, en consecuencia, se selecciona la nuez tipo FSI, modelo 16-5T3. La Figura 4-12 muestra un extracto del catálogo con las principales propiedades de esta nuez. Se destacan los siguientes parámetros:

- Carga estática, $C_o = 1331 \text{ kgf}$
- Carga Dinámica, $C = 731 \text{ kgf}$



Model	Size		Ball Dia.	PCD	RD	Circuits	Stiffness kgf / μm K	Dynamic Load 1x10⁶ revs C [kgf]	Static Load Co [kgf]			Flange				Bolt		Fit
	Nominal Dia.	Lead								D	L	F	T	BCD-E	X	Y	Z	
8-2.5T3	8	2.5	1.500	8.2	6.652	3	8	170	267	18	28	35	5	27	4.5	0	0	0
14-2.54T3	14	2.54	2.000	14.2	12.136	3	12	339	655	30	39	50	10.6	40	5	7	5	0
14-4T3		4		14.2	12.136	3	12	339	655	26	33	48	6	36	5.5	0	0	0
16-2T3		2	1.500	16.2	14.652	3	14	252	593	27	36	44	10	34	4.5	8	4.5	0
16-2.5T4		2.5		16.2	14.652	4	19	358	862	27	44	44	10	34	4.5	8	4.5	12
16-5T3	16	5	16.6	13.324	3	11	731	1331	30	46	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12	
16-514			3.1/5	16.6	13.324	4	12	936	1775	30	52	54	12	41	5.5	9.5	5.5	12

Figura 4-12 Principales propiedades de la nuez seleccionada. Fuente: Extracto del catálogo HIWIN de husillos

Como se ve, esta nuez cumple con las restricciones de paso, así como las de diámetro nominal. A continuación, se procede a validar este elemento a través de su carga estática admisible.

4.2.8.3.2 Estudio de la carga axial admisible

Asumiendo que el subsistema es perturbado por una carga durante su aceleración y su desaceleración, y usando un factor de seguridad estática, $f_s = 2$, se tiene que:

$$F_{amax} = \frac{C_0 a}{f_s} = \frac{1331}{2} = 665.5 [kgf] = 6528.6[N] \quad (93)$$

Así, la carga axial permisible es mucho mayor que la máxima carga axial aplicada, $F_{aMax} = 64.53 [N]$. Por lo tanto, no existirán problemas usando este modelo.

4.2.8.3.3 Estudio de la vida útil de servicio

1. Cálculo de las distancias de desplazamiento

Los parámetros empleados para este cálculo se muestran a continuación:

Máxima Velocidad, v_{max} 0.07 m/s

Tiempo de Aceleración, t_1 0.2s

Tiempo de Desaceleración, t_2 0.2s

- Distancia de desplazamiento durante la aceleración

$$l_{1-4} = \frac{v_{max} * t_1}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7mm \quad (94)$$

- Distancia de desplazamiento en movimiento uniforme

$$l_{2-5} = l_s - \frac{v_{max} * t_1 + v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = 400 - \frac{0.07 * 0.2 + 0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 486mm \quad (95)$$

- Distancia de desplazamiento en desaceleración

$$l_{3-6} = \frac{v_{max} * t_2}{2} \times 10^3 = \frac{0.07 * 0.2}{2} \times 10^3 = 7mm \quad (96)$$

La Tabla 4-6 Resume los valores obtenidos del tramo asociado a cada una de las fuerzas presentes a lo largo de la carrera.

Tabla 4-6 Cuadro Resumen de las distancias de cada fuerza existente. Fuente: Elaboración propia

Movimiento	Fuerza implicada $F_{aN}[N]$	Recorrido $l_N[mm]$
1.Durante Aceleración en Subida	64.53	7
2.Durante Subida Uniforme	43.53	386
3.Durante Desaceleración en Subida	22.53	7
4.Durante Aceleración en Bajada	-64.53	7
5.Durante Bajada Uniforme	-43.53	386
6.Durante Desaceleración en Bajada	-22.53	7

2. Carga Axial Promedio

A partir de los datos resumidos en la Tabla 4-6 se calcula la carga axial promedio del desplazamiento en y. Como las cargas son simétricas en ambas direcciones, solo se considerarán las de un solo sentido, entendiéndose que la carga promedio del sentido contrario es igual, pero del signo opuesto Esto es:

$$F_{Mader} = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \times l_s} (F_{a1}^3 \times l_1 + F_{a2}^3 \times l_2 + F_{a3}^3 \times l_3)} = 34.83 [N] \quad (97)$$

3. Vida Nominal

Para calcular la vida nominal del husillo, es necesario considerar los siguientes parámetros:

La vida nominal L, se calcula a partir de la siguiente expresión:

Número de reciprocaciones por minuto, 5 rpm	n
Carrera, l_s	600mm
Paso, Ph	5mm
Factor de carga, f_w	1.5
$L = \left(\frac{C_a}{f_w F_{Mder}} \right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{731 * 9.81}{1.5 * 34.83} \right)^3 \times 10^6 = 2.6 \times 10^{12} \text{ rpm}$	(98)

4. Revoluciones por minuto promedio

Las revoluciones por minuto promedio se calculan mediante la expresión mostrada a continuación:

$$N_M = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = \frac{2 * 5 * 400}{5} = 800 \text{ rpm} \quad (99)$$

5. Cálculo del tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal

En consecuencia, el tiempo de vida útil de servicio según la Vida Nominal es:

$$L_h = \frac{L}{60 * N_M} = \frac{2.6 \times 10^{12}}{60 * 800} = 54160000 \text{ hr} \quad (100)$$

6. Cálculo de la distancia de desplazamiento de vida útil de servicio según la Vida Nominal

El valor anterior también puede ser expresado en unidades de distancia, el cual es:

$$L_s = L * Ph * 10^{-6} = 13000000 \text{ Km} \quad (101)$$

En síntesis, considerando todos los parámetros calculados anteriormente, el modelo FSI-16-5T3 satisface con holgura los requerimientos impuestos de 7680 horas de servicio.

4.2.8.4 Estudio del Torque Rotacional

Como en el estudio de las fuerzas axiales presentes en cada etapa del desplazamiento a lo largo del husillo, los pares de torsión pueden ser divididos en las mismas seis etapas. Cada uno de estos torques tiene tres componentes: el torque que se genera a partir de la fricción de los elementos mecánicos involucrados, el torque necesario para la aceleración del conjunto motor-componentes mecánicos-husillo (cargas externas) y un torque que aparece cuando existen precargas en la nuez, el cual es nulo para efectos de este estudio.

4.2.8.4.1 Torque de fricción debido a cargas externas

El torque debido a la fricción se expresa matemáticamente como:

$$T_1 = \frac{F_{a2} * Ph}{2 * \pi * \eta} = \frac{64.53 * 5}{2 * \pi * 0.9} = 57.06 [Nmm] \quad (102)$$

Donde η corresponde a un factor asociado al coeficiente de fricción (estimativo).

4.2.8.4.2 Torque debido a precargas existentes en el husillo

No aplica para este caso, debido a que el modelo preseleccionado no contempla la existencia de precargas dentro de la nuez.

4.2.8.4.3 Torque necesario para la aceleración

Para determinar los torques asociados a los movimientos acelerados previamente es necesario obtener los momentos de inercia tanto del motor como de las cargas externas. De algunas referencias se tiene que aproximadamente el momento inercial por unidad de largo del husillo es $3.9 \times 10^{-4} [\frac{Kgcm^2}{mm}]$. En consecuencia, para un largo total aproximado de 600mm se tiene:

$$J_s = 3.9 \times 10^{-4} * 600 = 0.234 Kgcm^2 = 0.234 \times 10^{-4} [Kgm^2] \quad (103)$$

Ahora, considerando el momento de inercia que entregan los elementos mecánicos, se tiene:

$$\begin{aligned} J &= (m_p + m_{pn}) \left(\frac{Ph}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + J_s \\ &= (58 + 2) \left(\frac{5}{2\pi} \right)^2 \times 10^{-6} + 0.234 \times 10^{-4} \\ &= 6.14 \times 10^{-5} [Kgm^2] \end{aligned} \quad (104)$$

En paralelo, la aceleración angular se calcula a partir de la expresión:

$$\omega' = \frac{2\pi N_{Max}}{60 * t} = \frac{2\pi * 800}{60 * 0.2} = 419 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (105)$$

Si se considera que el momento de inercia del motor empleado para este desplazamiento en z tiene un valor de $J_m = 4 \times 10^{-4} [Kgm^2]$ (dato del fabricante), finalmente se obtiene que el torque requerido para la aceleración de las cargas externas es:

$$T_2 = (J + J_m) * \omega' = (6.14 \times 10^{-5} + 4 \times 10^{-4}) * 419 = 0.19 Nm = 193 Nmm \quad (106)$$

De esta manera, es posible identificar los torques en las seis fases de movimiento a lo largo del husillo. Dado que las cargas y los torques son simétricos para ambos sentidos,

basta solo con calcular tres: durante la aceleración, durante el movimiento uniforme y durante la desaceleración:

Durante la aceleración:

$$T_k = T_1 + T_2 = 250.06 \text{ [Nmm]} \quad (107)$$

Durante el movimiento uniforme:

$$T_t = T_1 = 57.06 \text{ [Nmm]} \quad (108)$$

Durante desaceleración:

$$T_g = T_1 - T_2 = -135.94 \text{ [Nmm]} \quad (109)$$

4.2.8.5 Justificación del Motor

4.2.8.5.1 Velocidad de rotación

Dado que el husillo ha sido seleccionado en base a la tasa de velocidad rotacional del motor, es innecesario realizar cálculos sobre este.

4.2.8.5.2 Torque requerido para el motor

Del estudio realizado previamente, es posible determinar cuál es el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento frontal del extrusor, el cual se encuentra en la fase de aceleración ($T_{max} = T_k = 250.06 \text{ [Nmm]}$). En este caso, el motor es capaz de satisfacer con suficiente holgura dicho requerimiento.

4.2.9 Justificación Guías Lineales para el desplazamiento en Y

Los rieles serán montados como lo muestra la Figura 4-13.

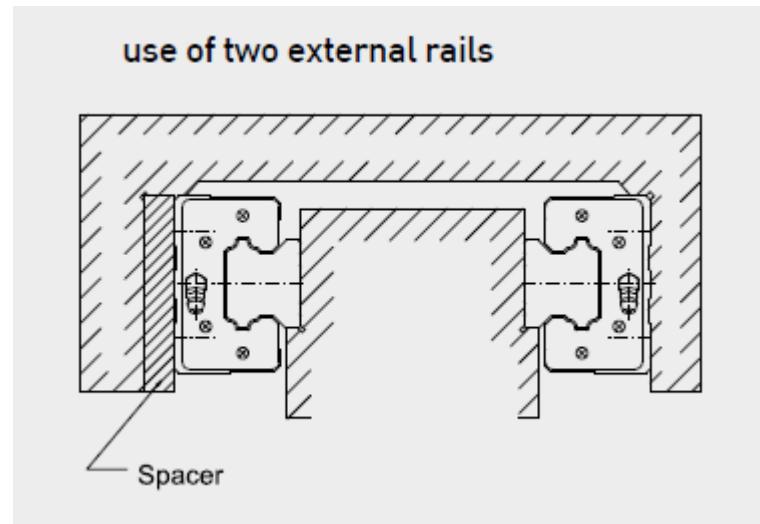


Figura 4-13 Montaje de las guías lineales para el desplazamiento en Y. Fuente: Extracto de catálogo HIWIN

Como se vio en el estudio previo del husillo, la fuerza de mayor magnitud se presenta en la aceleración (independiente de el sentido de esta), por lo que es esta carga que se utilizará para efectos de la justificación de las guías lineales. Los valores de cada constante mostrados en la Figura 4-9 , aplicado al caso del desplazamiento en Y son los siguientes:

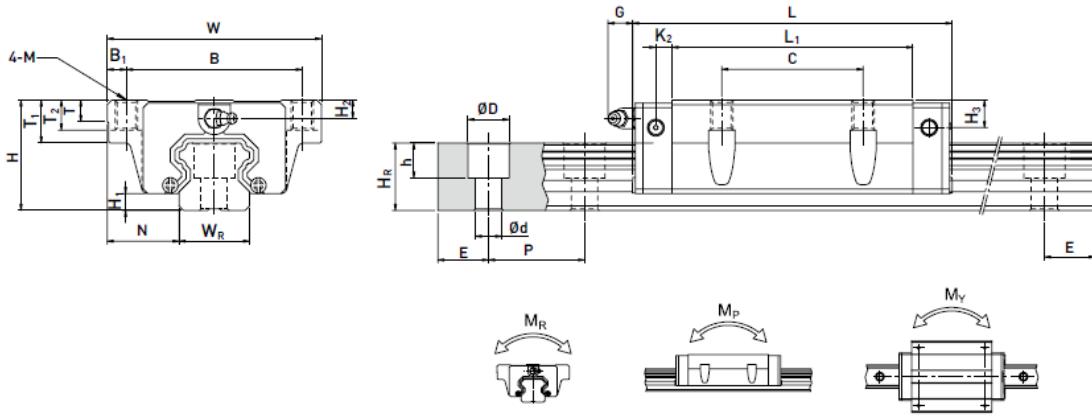
$$\begin{aligned}
 F &: 152.1[N] \\
 W &: 2 [kg] \\
 l &: 60[mm] \\
 h &: 40[mm] \\
 d &: 80[mm] \\
 c &: 84[mm]
 \end{aligned}$$

La carga equivalente que incide en cada bloque es de la misma magnitud, pero de sentido contrario entre ellos, calculada a continuación:

$$\begin{aligned}
 P_1 \sim P_2 &= \left| +\frac{Wgh}{2d} - \frac{Fl}{2d} \right| = \left| +\frac{2 * 9.81 * 40}{2 * 80} - \frac{152.1 * 60}{2 * 80} \right| = |-52.13| [N] \\
 &= |-0.052|[kN]
 \end{aligned} \tag{110}$$

$$P_1 = 0.052 [kN]; P_2 = -0.052 [kN] \tag{111}$$

Debido a que no se contemplan precargas en los bloques, estas fuerzas calculadas serán consideradas como las cargas máximas. Dada la baja magnitud, y entendiendo las disponibilidades reales del mercado, se selecciona la guía lineal del fabricante HIWIN, modelo N° HGW-20CC. La Figura 4-14 muestra los principales parámetros de la guía lineal preseleccionada.



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)										Dimensions of Block (mm)										Dimensions of Rail (mm)										Mounting Bolt for Rail	Basic Dynamic Load Rating	Basic Static Load Rating	Static Rated Moment			Weight	
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	G	M	T	T ₁	T ₂	H ₂	H ₃	W _R	H _R	D	h	d	P	E	(mm)	C(kN)	C ₁ (kN)	kN-m	kN-m	Block	Rail						
HGW15CC	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.9	6.95	3.95	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45					
HGW20CC	30	4.6	21.5	63	53	5	40	50.5	77.5	10.25	6	12	M6	8	10	9.5	6	6	20	17.5	9.5	8.5	6	60	20	M5x16	17.75	27.76	0.27	0.20	0.20	0.40	2.21					
HGW20HC																																						

Figura 4-14 Guía Lineal preseleccionada. Fuente: Extracto del catálogo HIWIN

Se destacan a continuación las propiedades de cargas y momentos admisibles para el modelo preseleccionado. En este caso el momento de interés es el de “cabeceo” que es el de mayor magnitud que recibe en la práctica.

Carga dinámica, C [kN] 17.75

Carga estática, C_0 [kN] 27.76

Momento estático, M_y 0.20
[kNm]

4.2.9.1 Factor de Seguridad estático

Considerando los cálculos de carga y momento, es posible contrastarlos con los valores admisibles mediante la ecuación de factor de seguridad estático (f_{SL} para la carga, f_{SM} para el momento). Para estos cálculos, se entiende como suficientemente aceptables factores de seguridad por sobre 3, para ambos casos:

$$f_{SL} = \frac{C}{P} = \frac{16.97}{0.052} = 326.3 > 3.0 \quad (112)$$

$$f_{SM} = \frac{M_0}{M} = \frac{0.12}{0.008} = 14.38 > 3.0 \quad (113)$$

Vemos que en estos casos se supera con holgura los factores de seguridad impuestos.

4.2.9.2 Vida nominal

Para calcular la vida nominal, es necesario considerar un factor de carga, f_w cuyo valor sugerido por el fabricante es de 1.2 para velocidades de operación bajas. El cálculo de L permite predecir la distancia total que recorrerá un bloque con una confiabilidad del 90%.

$$L = \left(\frac{C_0}{f_w * P}\right)^3 \times 50Km = \left(\frac{11.38}{1.2 * 0.131}\right)^3 \times 50 = 18968700 \text{ km} \quad (114)$$

En este caso, fue utilizada la carga dinámica promedio obtenida en la ecuación (97) así como la carga dinámica admisible característica del modelo de la guía lineal.

4.2.9.3 Vida nominal de servicio

Asimismo, es posible interpretar la vida nominal en función de las horas de operación, usando la máxima velocidad de servicio por medio de la siguiente expresión:

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{v_e * 60} = \frac{18968700 \times 10^3}{0.07 * 60 * 60} = 75272900 \text{ hr} \quad (115)$$

En síntesis, la guía lineal HIWIN modelo HGW-15CC satisface los requerimientos solicitados para el desplazamiento en z tanto para las horas de operación, cargas estáticas admisibles y momentos admisibles.

4.2.10 Análisis de tensiones del subconjunto “Puente”.

Para el estudio de tensiones y desplazamientos del subsistema “Puente” Se utilizó la herramienta *Análisis de Tensiones* del software *Autodesk Inventor*. Dicho análisis utiliza el método de elementos finitos, dada una geometría, propiedades de material y un set de condiciones iniciales enumeradas a continuación.

Geometría: Se utiliza una versión de una pieza maciza del subconjunto “Puente” definida en la fase de Ingeniería Conceptual. El detalle de medidas se encuentra en su respectivo plano adjunto en este trabajo. Cabe señalar que, a diferencia del plano, para este caso se utiliza un espesor de pared de placa igual a 5mm en todas sus piezas, a diferencia de los 8 o 6 mm que tienen de espesor las placas mostradas en dicho plano. Este cambio se implementa principalmente debido al método de fabricación definido en esta instancia: Corte láser de placas de acero, cuyo proveedor no trabaja con placas de mayor espesor. La Figura 4-15 entrega una vista isométrica de la geometría estudiada.

Material: Se utiliza el Acero AISI 1020 debido a que es un acero muy fácil de encontrar en el mercado. Su módulo de Young es de 210.000 MPa y su límite de fluencia son 27 MPa.

Condiciones de borde: Como se ve en la Figura 4-16, se realiza un empotramiento en el punto (1).

Fuerzas y Momentos aplicados: Existen tres tipos de fuerzas sobre el sistema. A saber: La fuerza de peso producto de la gravedad (2). Fuerza producto del peso del extrusor y subsistema “mesa vertical”, (3) consistente en 300 [N] orientados en sentido

de la gravedad y las fuerzas que aparecen producto del momento generado por el peso del extrusor y subsistema “mesa vertical”. El cual a su vez se sub-divide en dos fuerzas de misma magnitud absoluta de 143 [N] y sentido, pero de direcciones opuestas, (4) y (5).

Malla: Se utiliza una malla estándar que se genera de manera automática por el programa. La Tabla 4-7 muestra la configuración utilizada para esta simulación. Bajo dichas configuraciones, se generan un total de 2973 nodos y 1856 elementos.

La Figura 4-15 muestra gráficamente la modelación realizada, en la cual se ven las principales cotas a modo de dimensionamiento del subsistema Puente. Asimismo, se observa las cargas aplicadas y su localización en la geometría, junto con sus condiciones de borde.

Tabla 4-7 Configuración de malla empleada en la simulación.

Tamaño medio de elemento (como fracción de la longitud del cuadro delimitador)	0,100
Tamaño mínimo de elemento (como fracción del tamaño medio)	0,200
Factor de modificación	1,500
Ángulo máximo de giro	60,00 gr

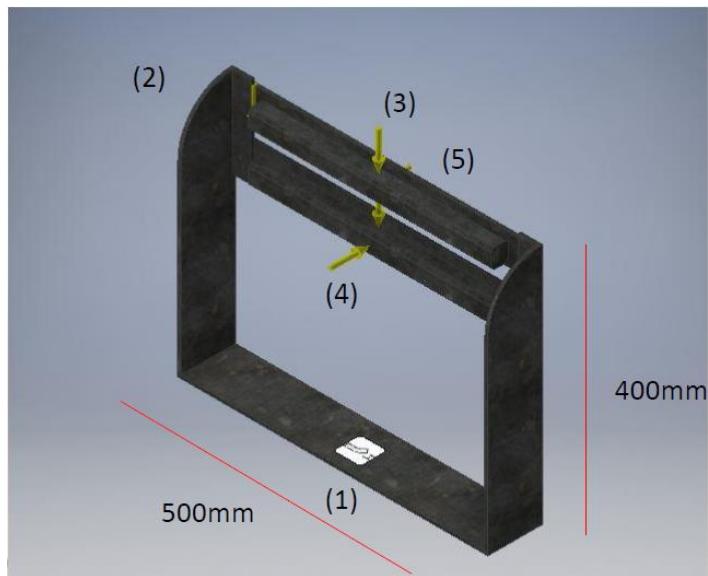


Figura 4-15 Modelación utilizada para el estudio mecánico del subconjunto puente. Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al estudio de tensiones, a partir de la Figura 4-16 se grafica los resultados obtenidos de la máxima tensión, la que se encuentra cerca del extremo de las guías lineales cuya magnitud es de 7,481 MPa, según Von Mises. Sabiendo que el límite de

fluencia del Acero 1020 es de 27 MPa, es posible asegurar que existe una holgura de 3.4 veces el valor obtenido con respecto al límite admisible. Por lo que el subsistema puente cumple con los criterios estructurales impuestos originalmente.

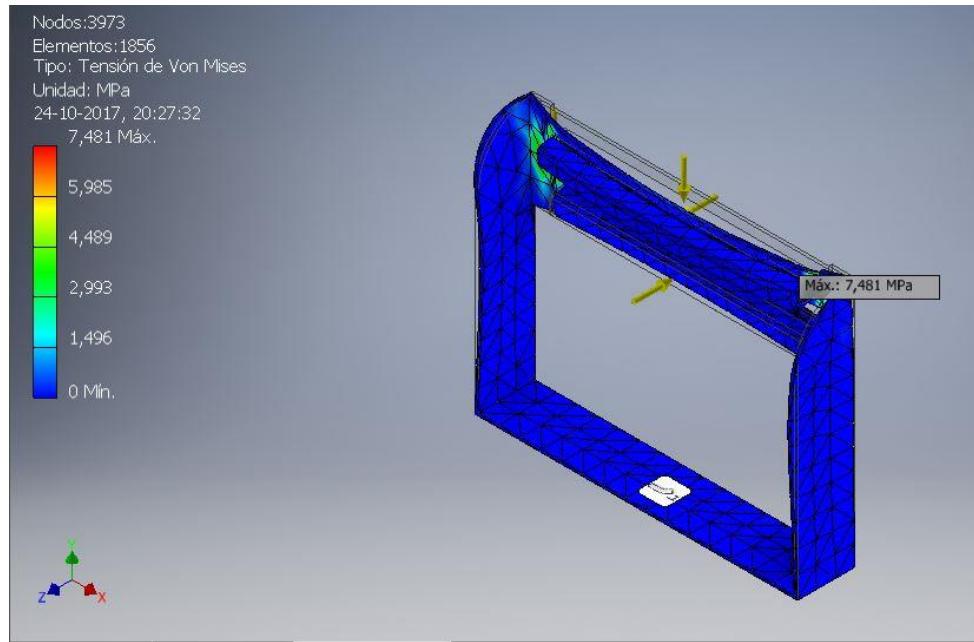


Figura 4-16 Resultados para el estudio de Tensión de Von Mises. Fuente: Elaboración propia

Con respecto al estudio de deformaciones. La Figura 4-17 muestra los resultados obtenidos de la máxima deformación, la que se encuentra en la mitad del subconjunto puente cuya magnitud es de 0,02136 mm. Si se considera que el largo del Rail es de 400mm, la tasa de deformación es de 0.00534%. El parámetro impuesto exigía una deformación máxima del 0.1%, por lo que se cumple 18.7 veces lo requerido inicialmente. En consecuencia, el subsistema Puente cumple con los criterios de precisión impuestos originalmente.

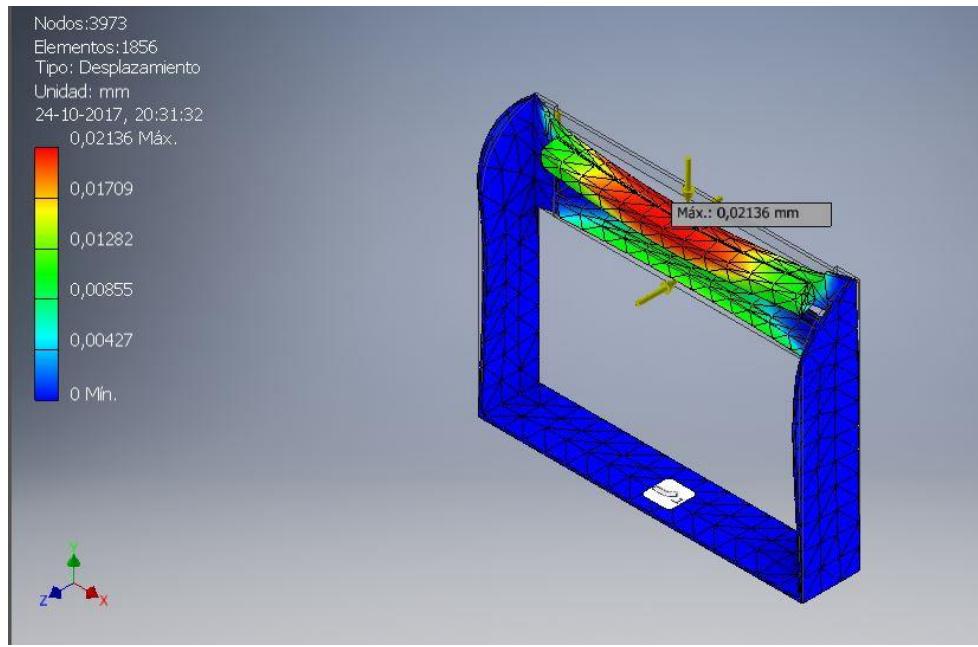


Figura 4-17 Resultados para el estudio de desplazamientos en el subsistema. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, la Tabla 4-8 muestra un resumen de los resultados obtenidos de la simulación, tanto de tensión, deformación y desplazamientos dentro del subsistema puente, además de las propiedades físicas de la estructura. La presente tabla, muestra los valores máximos y mínimos para cada ítem.

Tabla 4-8 Resumen de los resultados obtenidos de la simulación. Fuente: Elaboración propia

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	1586640 mm ³	
Masa	12,4551 kg	
Tensión de Von Mises	0,00000538341 MPa	7,48142 MPa
Primera tensión principal	-1,78298 MPa	8,60974 MPa
Tercera tensión principal	-7,77257 MPa	1,65836 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0213641 mm
Coeficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-4,32486 MPa	4,91637 MPa
Tensión XY	-2,58975 MPa	2,45283 MPa
Tensión XZ	-1,76381 MPa	1,84811 MPa
Tensión YY	-4,62126 MPa	4,20621 MPa
Tensión YZ	-2,0439 MPa	2,29059 MPa
Tensión ZZ	-7,29233 MPa	8,102 MPa
Desplazamiento X	-0,00592098 mm	0,00533355 mm
Desplazamiento Y	-0,00816807 mm	0,000296465 mm
Desplazamiento Z	-0,0154788 mm	0,0210293 mm

De la misma manera, se hizo un estudio del comportamiento del subsistema “Puente”, esta vez en su versión final obtenida en la fase de ingeniería de Detalle. Para este caso, se utilizan las mismas condiciones de borde, al igual que las cargas aplicadas. La geometría se puede ver en la Figura 4-18 y el espesor de la pared también es de 5mm, como en el estudio en la fase conceptual, asimismo, el material empleado, es el Acero AISI1020.

Para este caso, el mallado corresponde a aquel estándar que se genera de manera automática por el programa, generando un total de 20964 nodos y 10260 elementos.

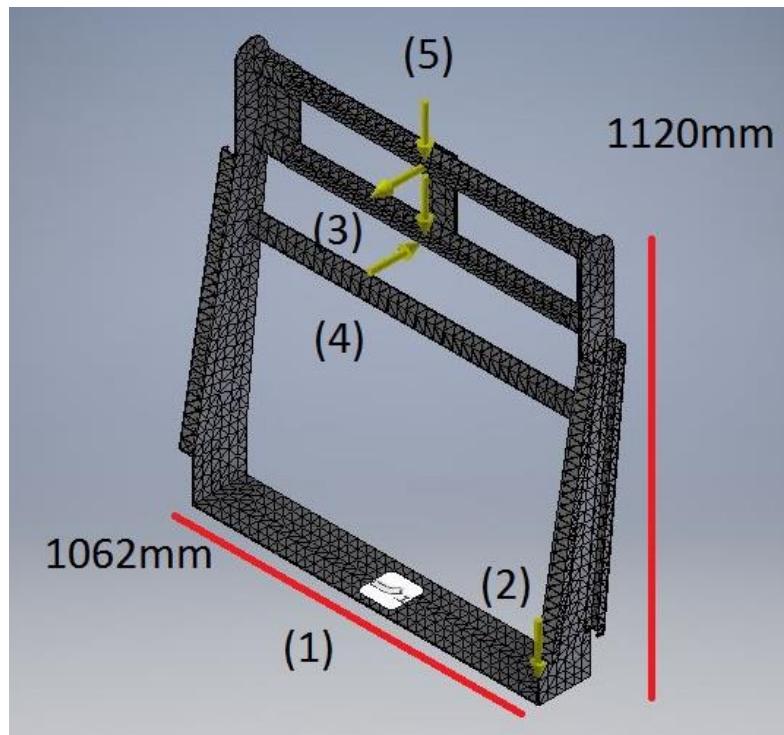


Figura 4-18 Modelación utilizada para el estudio mecánico del subconjunto Puente de la Ingeniería Conceptual. Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al estudio de tensiones, a partir de la Figura 4-19 se grafica los resultados obtenidos de la máxima tensión, la que se encuentra cerca del extremo de las guías lineales cuya magnitud es de 8,241 MPa, según Von Mises. Sabiendo que el límite de fluencia del Acero 1020 es de 27 MPa, es posible asegurar que existe una holgura de 3.27 veces el valor obtenido con respecto al límite admisible. Por lo que el subsistema puente, en su diseño final, también cumple con los criterios estructurales impuestos originalmente.

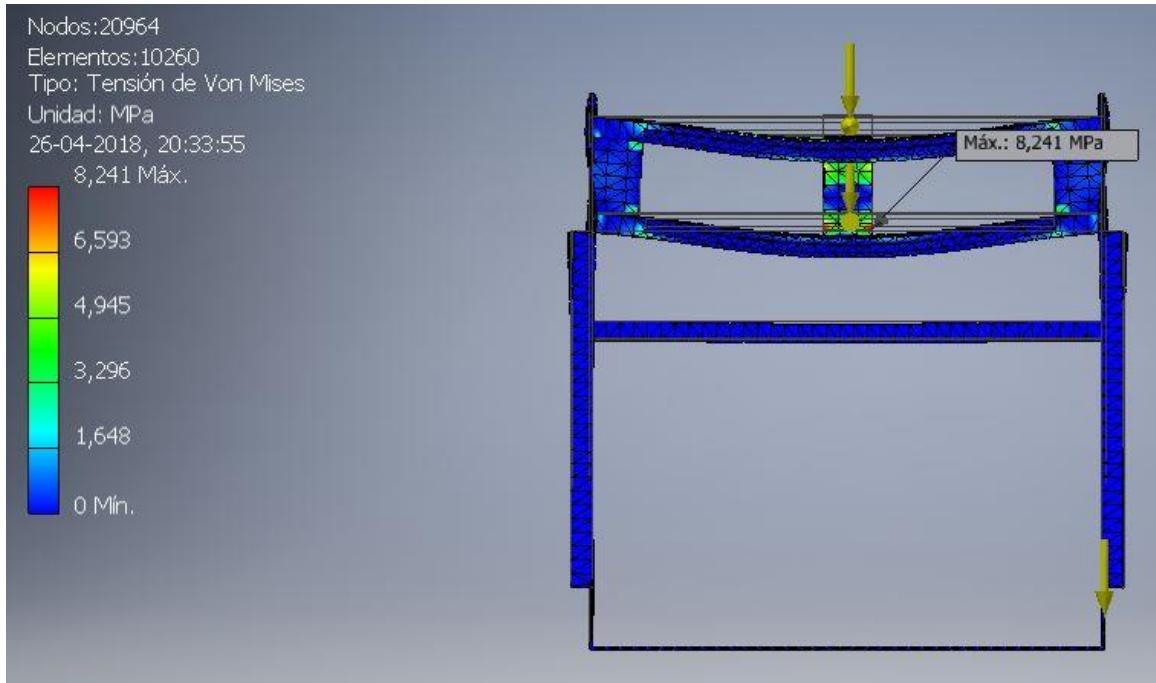


Figura 4-19 Resultados para el estudio de Tensión de Von Mises del diseño final del subsistema "Puente". Fuente: Elaboración propia

Con respecto al estudio de deformaciones. La Figura 4-20 muestra los resultados obtenidos de la máxima deformación, la que se encuentra en la mitad del subconjunto puente cuya magnitud es de 0,08505 mm. Si se considera que el largo del Rail es de 1062mm, la tasa de deformación es de 0.008%. El parámetro impuesto exigía una deformación máxima del 0.1%, por lo que se cumple 12,5 veces lo requerido inicialmente. En consecuencia, el subsistema Puente, en su diseño final, cumple con los criterios de precisión impuestos originalmente.

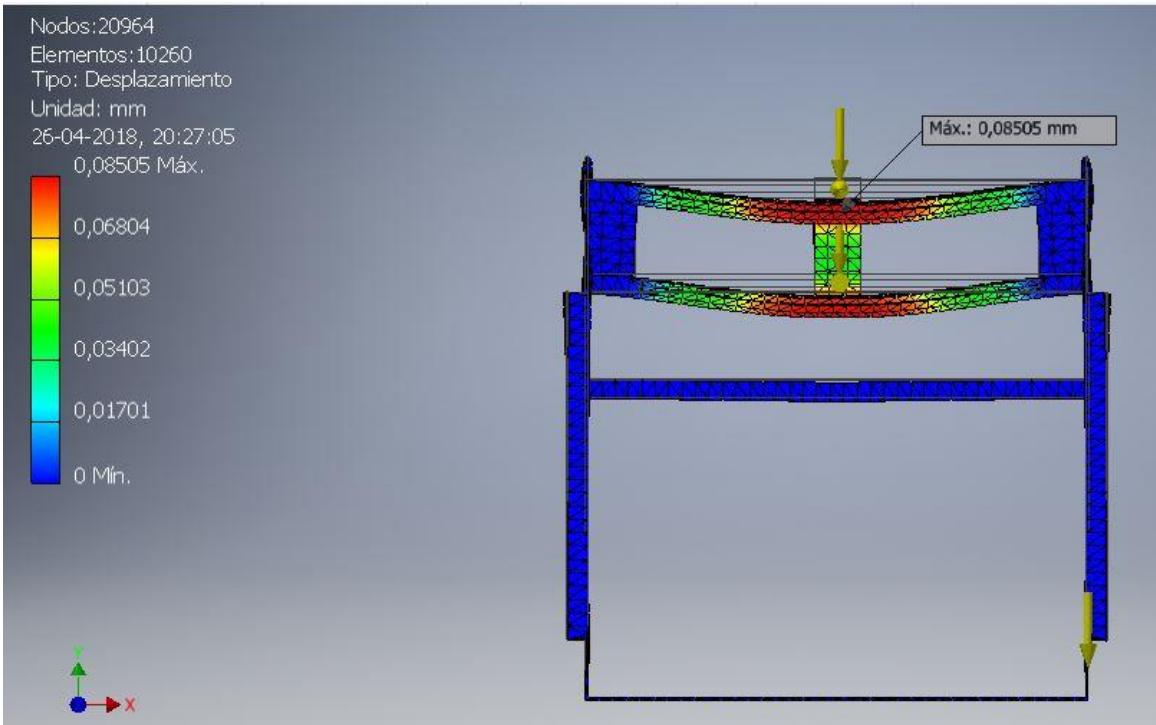


Figura 4-20 Resultados para el estudio de desplazamientos en el subsistema "Puente" del diseño final. Fuente: Elaboración Propia

4.2.11 Pruebas en el prototipo del extrusor.

Pese a que el extrusor de referencia fue justificado mediante experimentos de prueba y error, de igual forma se realiza una maqueta para llevar a cabo pruebas cualitativas que permitan evidenciar de primera fuente algunos puntos a considerar para la fabricación del extrusor de concreto de la impresora.

La Figura 4-21 muestra el prototipo fabricado. La fuente de poder, al igual que el barreno fueron obtenidos a partir de una fuente de chocolate de coctelería pequeña, al cual se le agregó un dimmer para poder regular la velocidad de rotación del barreno y hacer distintas pruebas. El acoplamiento, al igual que el soporte fueron fabricados en una impresora 3D, mientras que la estructura fue dibujada y posteriormente cortada en una cortadora láser perteneciente a la universidad. La boquilla y la tubería son de PVC y fueron unidas con *vinilit*.



Figura 4-21 a) Maqueta del extrusor de concreto y su montaje. **b)** Vista enfocada al extrusor. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el hormigón fue simulado como una mezcla de harina (que simula el concreto), agua y semillas (que simulan los áridos). Se mezclaron en una proporción que en modo tal que asemeje al material de impresión. (Ver Figura 4-22.a)

El experimento no arrojó todos los resultados esperados debido principalmente al pequeño tamaño de la maqueta tanto geométricamente como desde el punto de vista de la potencia del motor utilizado, la cual dificultaba una homologación con un dispositivo de mayor escala. De todas formas, las conclusiones que arrojaron este experimento cualitativo son consideradas y son detalladas a continuación.

La fabricación de la maqueta *per se* significó la identificación de aspectos importantes a la hora de ensamblar o montar el extrusor. Se evidenció la importancia de una correcta alineación axial de todos los componentes, así como los requerimientos de fácil desmontaje para su lavado interior.

Durante el experimento se evidenció la diferencia en torques que podría llegar a ocurrir en el motor cuando está extruyendo o no el concreto, lo cual muestra la importancia de utilizar un motor lo suficientemente potente para extruir el hormigón.



Figura 4-22 a) Simulación del concreto. b) pruebas del compuesto sobre el extrusor. Fuente: Elaboración propia

Otra conclusión arrojada por el prototipo muestra la importancia de mantener lo más anclado posible el extrusor, ya que la misma carga que se le aporta desde la entrada produce vibraciones en el extrusor, afectando la durabilidad de los materiales, así como de la precisión de la impresión (Ver Figura 4-22.b)

4.3 Ingeniería de Detalle

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos de la ingeniería de detalle, una imagen isométrica del conjunto se muestra al inicio de la sección (Ver Figura 4-23). Para obtener mayores detalles técnicos como cotas o tipos de soldaduras, se encuentran en los planos adjuntos a este reporte en la sección de Anexos.

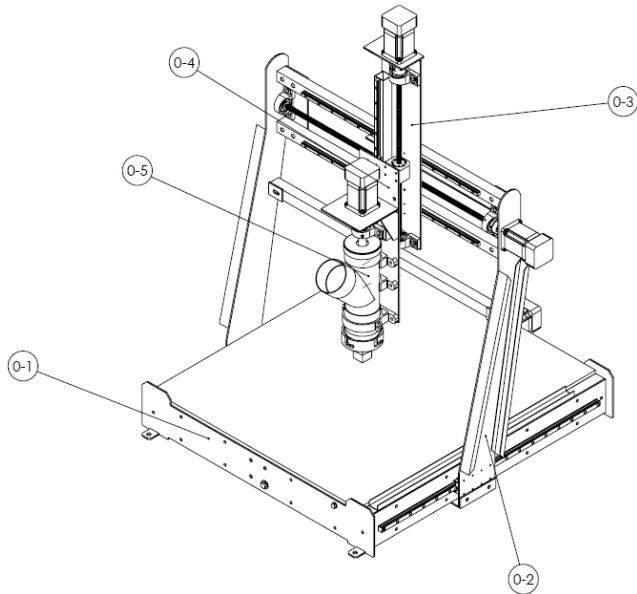


Figura 4-23 Vista isométrica de la impresora 3D extrusora de hormigón. Fuente: Elaboración propia

Como es posible notar, se mantienen la gran mayoría de las definiciones de la etapa de ingeniería conceptual, como la cantidad de motores a utilizar, la arquitectura general, los principios de extrusión y la definición de los elementos mecánicos asociados al desplazamiento, como rieles y tornillos de potencia.

Sin embargo, existen otras definiciones que no alcanzan a llegar a esta última etapa, las principales son detalladas a continuación, utilizando la Figura 4-24 como apoyo.

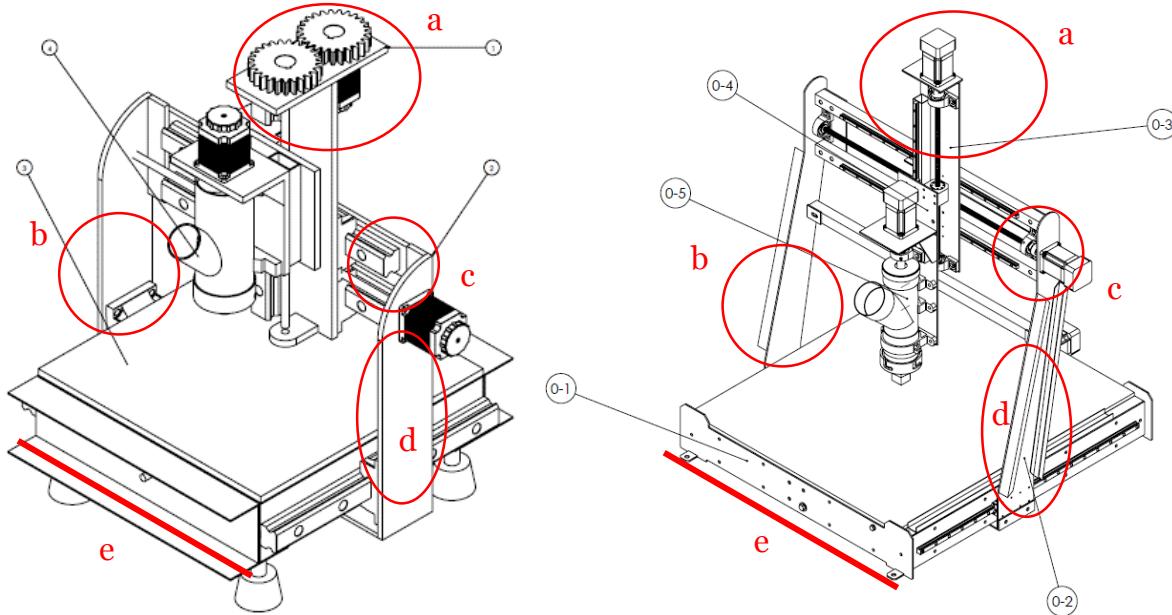


Figura 4-24 Comparación del diseño conceptual, en contraste con el diseño en detalle. Fuente: Elaboración propia.

- Cambio en la disposición de los motores:** De una configuración co-axial presente en la ingeniería conceptual, se pasa a una disposición axial, esto debido a que una vez realizada la selección detalla de elementos mecánicos que rodean estos motores, se comprueba que no existe una superposición de motores ni se llegarán a topar entre ellos en ninguna instancia. Por otro lado, una configuración co-axial, como aquella utilizando dos engranajes, siempre traerá problemas de eficiencia de transmisión de potencia, además es una solución más compleja, al involucrar más partes.
- Inclinación del puente:** Debido a que se prevé que el centro de masa de la impresora, al momento de estar cargada con material, esté un poco más adelante que su punto de apoyo, se generará un momento que a la larga podría disminuir la vida útil de los bloques situado a los costados de la base. Una pequeña inclinación, como la que se ve en el dibujo conceptual, aproxima el centro de masa al punto de apoyo.
- Sustitución de placas por perfiles:** Las razones por las que se sustituyeron las placas que oficiaban de travesaños superiores del puente en el dibujo conceptual, a tres perfiles cuadrados en la zona alta del dibujo de detalle pueden ser resumidas en tres puntos: primero, la máquina dobló sus dimensiones de longitud, por lo que era necesario un perfil que pudiera resistir de mejor manera las flexiones que podría generar el peso del resto de los subsistemas, ahora situados a una mayor distancia de los extremos. Segundo, debido a la disposición de los rieles en comparación con el tornillo de potencia, era necesario que estos cumplieran ciertas diferencias de altura con respecto a una referencia común para su correcto ensamblaje, por lo que una placa no era suficientemente espesa para satisfacer cierta diferencia de alturas, siendo necesario montar unos perfiles. Finalmente,

dado a que sobraban perfiles cuadrados utilizados en la estructura de la base, fueron aprovechados para esta instancia, reduciendo los costos de fabricación.

- d) Incorporación de pestañas en los laterales del puente: Dadas estas nuevas dimensiones de la máquina, era necesario incorporar más resistencia en las placas laterales que sostienen el puente, y, al mismo tiempo, realizarlo con el menor peso posible, por lo que se incorporan dichas pestañas en ambos extremos (imitadas a partir de observaciones de máquinas de prestaciones similares). Los perfiles "C" utilizados eran residuos de otros proyectos anteriores en el taller, por lo que no implicó mayores costos su implementación.
- e) Cambio de las dimensiones de la máquina: Pese a que el plano conceptual cumplía con las exigencias de área mínima de impresión, se decide incrementar a aproximadamente el doble las dimensiones de la impresora, ya que los costos asociados a tal crecimiento no eran excesivamente mayores, puesto que la mayoría de los elementos mecánicos serían los mismos, independiente de sus dimensiones (extrusor, rodamientos, bloques, etc). Dada, la holgura presupuestaria se decide por incrementar el tamaño de la impresora.

El conjunto fue dividido en dos sistemas principales, que a su vez se dividen en diversos subsistemas. Por un lado, se tiene el sistema de desplazamiento cartesiano, dividido en Base (o-1 en la imagen), Puente (o-2 en la imagen) y Mesa Horizontal (o-3 en la imagen). Por otra parte, se tiene el sistema de extrusión, compuesto por el porta-extrusor (o-4 en la imagen) y el respectivo extrusor de hormigón (o-5 en la imagen). A continuación, se presenta el detalle de cada uno de los sistemas.

4.3.1 Sistema de Desplazamiento

El sistema de desplazamiento se desglosa en los siguientes subsistemas.

4.3.1.1 Base

La Figura 4-25 muestra una vista explosionada del subsistema Base. Para una mejor comprensión de la imagen, fueron omitidos la gran mayoría de los elementos de sujeción y solo se deja una muestra de cada uno de los elementos utilizados en todo el subsistema. De todas formas, en la Tabla 4-9 se muestra un listado de las piezas que conforman la Base, y en ella se detalla la cantidad de pernos, tuercas y golillas empleados como elementos de sujeción.

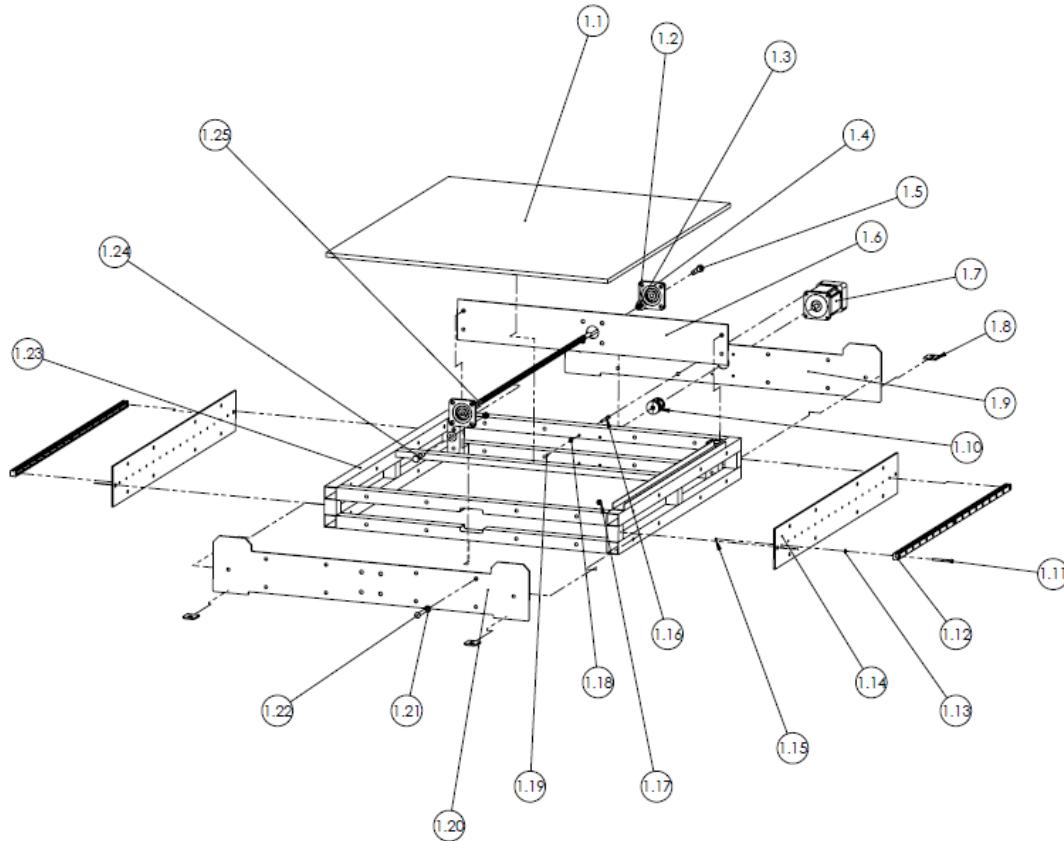


Figura 4-25 Explosión del subsistema Base. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-9 Lista de piezas que forman parte del subsistema Base. Fuente: Elaboración propia

Nº de Elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
1.1	Plataforma de Impresión	Madera Terciada 1090mmx940mmx1/2"	1
1.2	Tuerca M12	Tuerca Hex. T8 M12 P.1.75 ZINC	8
1.3	Golilla de presión M12	ZINC	8
1.4	Rodamiento de soporte Axial	F-203 estándar	2
1.5	Perno Hex M12X70	8.8 P. 1.75 ZINC	4
1.6	Porta Rodamiento		1
1.7	Motor movimiento en Y		1
1.8	Orejas de Fijación		4
1.9	Cara Posterior		1
1.10	Acoplamiento	L-75	1
1.11	Perno Cil M5X35	P.0.8 Zinc	34
1.12	Riel 20X1000	HIWIN	2
1.13	Golilla de presión M5	Zinc	34
1.14	Cara Lateral		2
1.15	Tuerca Hex. M5	T8 P.0.8 Zinc	34
1.16	Tornillo Cruz M5		4
1.17	Tuerca Hex M10	T8 P.1.5 Zinc	36
1.18	Tuerca Hex M5		4
1.19	Golilla M5	Zinc	4
1.20	Cara Frontal		1
1.21	Golilla de presión M10	Zinc	72
1.22	Perno Hex M10x60	T8 P.1.5 Zinc	36
1.23	Estructura de la Base	Ver Plano 1-B y 1-C	1
1.24	Perno Hex M12X40	8.8 P. 1.75 ZINC	4
1.25	Tornillo de Potencia		1

4.3.1.2 Puente

La Figura 4-26 muestra una vista explosionada del subsistema Puente. Para una mejor comprensión de la imagen, fueron omitidos la gran mayoría de los elementos de sujeción y solo se deja una muestra de cada uno de los elementos utilizados en todo el subsistema. De todas formas, en la Tabla 4-10 se muestra un listado de las piezas que conforman el Puente, y en ella se detalla la cantidad de cada pernos, tuercas y golillas empleados como elementos de sujeción.

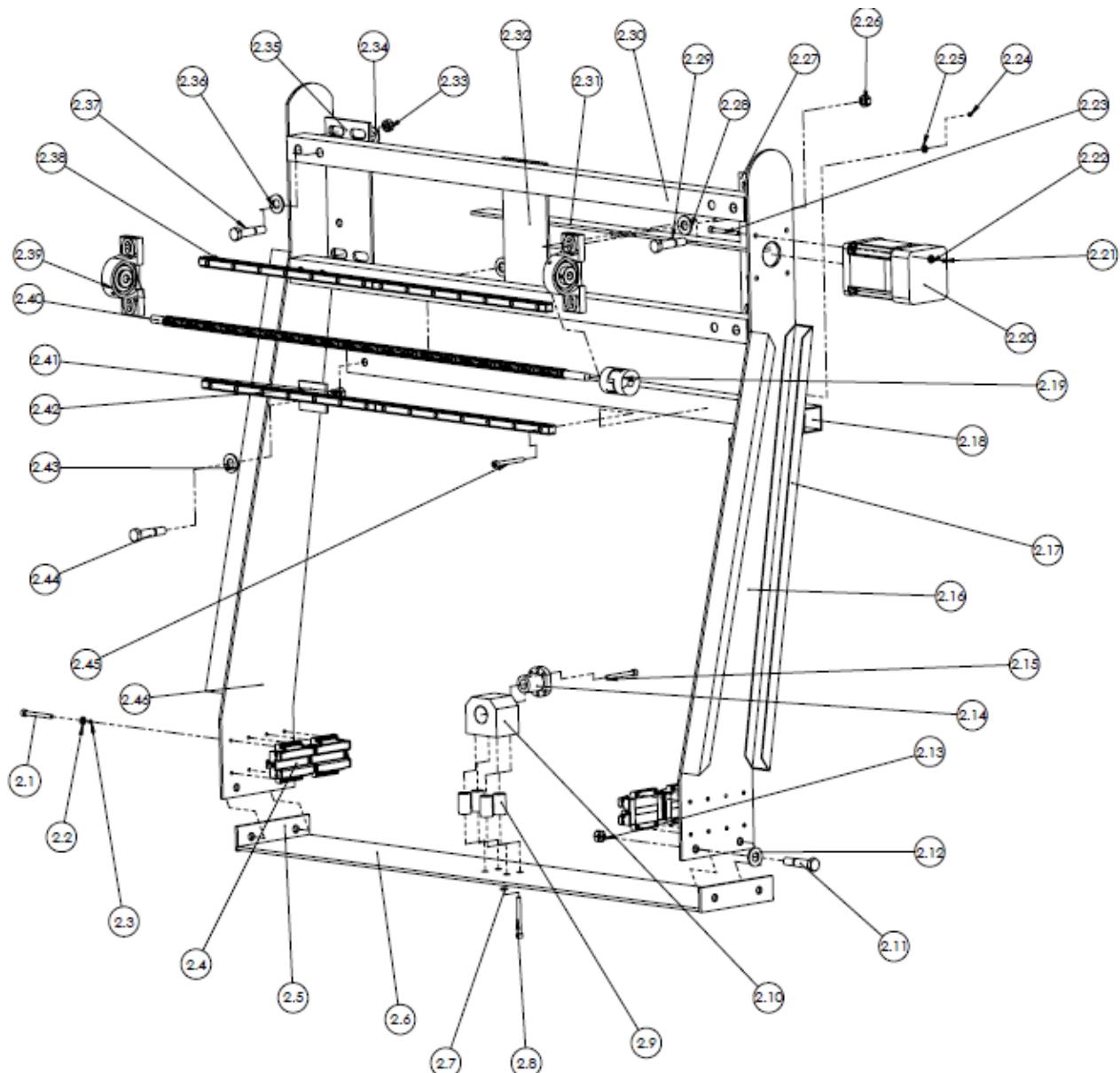


Figura 4-26 Explosiónado del subsistema Puente. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10 Lista de piezas que forman parte del subsistema Puente. Fuente: Elaboración propia

Nº De elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
2.1	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	16
2.2	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	32
2.3	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	32
2.4	Bloque	HIWIN Modelo HGW-20CC	4
2.5	Pestaña unión	Placa 5mm A36	2
2.6	Placa Inferior	Placa 5mmA36	1
2.7	Golilla M10	ZINC	8
2.8	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
2.9	Buje de altura	Technyl	4
2.10	Portanuez	Acero SAE 1020	1
2.11	Perno HEX M12X6030	8.8 ZINC	4
2.12	Golilla M12	ZINC	8
2.13	Tuerca Hex M12	8.8 Zinc	4
2.14	Nuez	-	1
2.15	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6
2.16	Placa Lateral Izquierda	Placa 5mm A36	1
2.17	Pestaña de Refuerzo	Perfil C 2x20x40x720mmSAE1020	4
2.18	Viga Maestra	Perfil 2x40x40x1052mm SAE1020	1
2.19	Acoplamiento	L75	1
2.20	Motor de movimiento en X	-	1
2.21	Tuerca Hex M5	Zinc	4
2.22	Golilla Hex M5	Zinc	4
2.23	Tornillo Cruz M5	-	4
2.24	TUERCA HEX. T8 M5	Zinc	34
2.25	GOLILLA PL-PRE M5	Zinc	34
2.26	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
2.27	Placa porta rodamiento izq.	Placa 5mm a36	1
2.28	Golilla M10	ZINC	8
2.29	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
2.30	Travesaño Portafiel	Perfil 2x40x40x1052mmSAE1020	2
2.31	Placa Portacables	Placa 5mm a36	1
2.32	Placa de centro	Placa 5mm a36	1
2.33	TUERCA HEX. #2 UNC 9/16"	Zinc	8
2.34	GOLILLA PL-PRES 9/16"	Zinc	16
2.35	Placa porta rodamiento der,	Placa 5mm a36	1
2.36	GOLILLA PL-PRES 9/16"	Zinc	16
2.37	PERNO HEX 9/16 X 2 1/2"	#2 UNC Zinc	8
2.38	Riel 15x1000	HIWIN	2
2.39	Rodamiento c/sostene	UCP201	2
2.40	Tornillo de Potencia	1000mm	1
2.41	Tuerca Hex M12	8.8 Zinc	2
2.42	Oreja se sujeción	Placa 5mm a36	2
2.43	Golilla M12	Zinc	4
2.44	Perno HEX M12X60	8.8 Zinc	2
2.45	PERNO COCINA M5 X 35	Zinc	34
2.46	Placa Lateral Derecha	Placa 5mm a36	1

4.3.1.3 Mesa Horizontal

La Figura 4-27 muestra una vista explosionada del subsistema “Mesa Horizontal”. Para una mejor comprensión de la imagen, fueron omitidos la gran mayoría de los elementos de sujeción y solo se deja una muestra de cada uno de los elementos utilizados en todo el subsistema. De todas formas, en la Tabla 4-11 se muestra un listado de las piezas que conforman la Mesa Horizontal, y en ella se detalla la cantidad de cada pernos, tuercas y golillas empleados como elementos de sujeción.

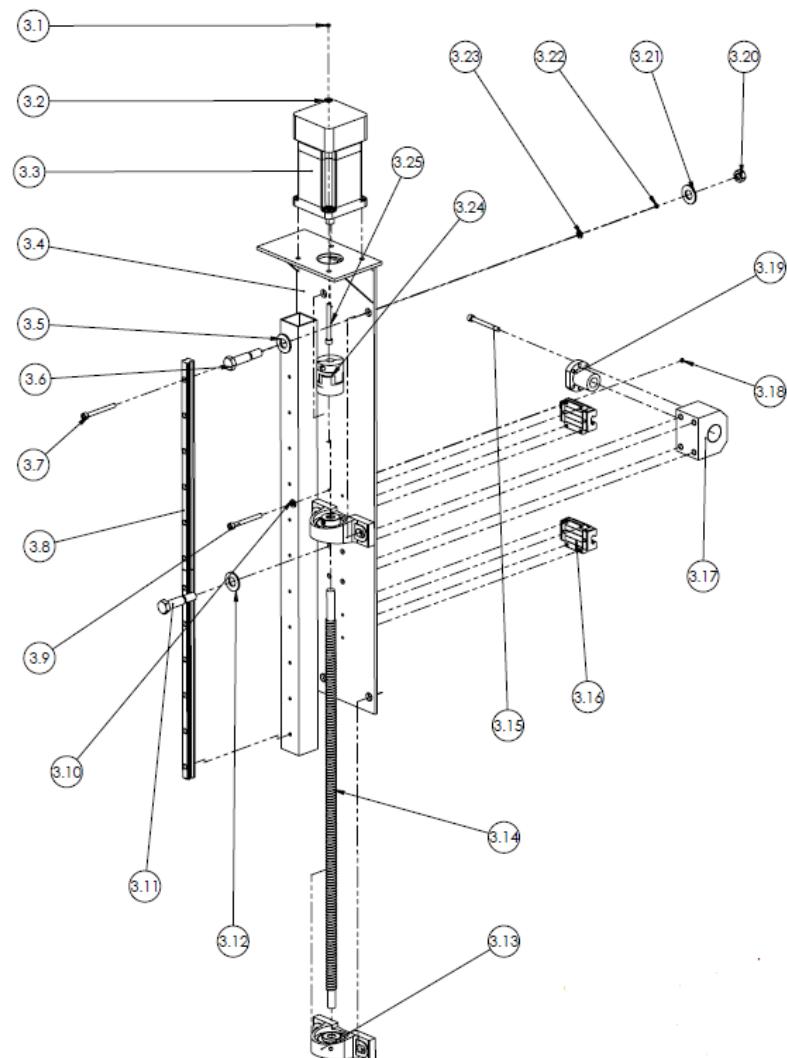


Figura 4-27 Explosionado del subsistema Mesa Horizontal. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-11 Lista de piezas que componen del subsistema Mesa Horizontal. Fuente: Elaboración propia

Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
3.1	Tuerca Hex M5	Zinc	4
3.2	Golilla Hex M5	Zinc	4
3.3	Motor de movimiento en Z	-	1
3.4	Estructura Principal	Ver planos 3-D y 3-E	1
3.5	Golilla M10	ZINC	8
3.6	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
3.7	PERNO COCINA M5 X 35	Zinc	34
3.8	Riel 15x1000	HIWIN	1
3.9	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	8
3.10	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	16
3.11	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
3.12	Golilla M10	ZINC	4
3.13	Rodamiento c/sostiene	UCP201	2
3.14	Tornillo de Potencia	1000mm	1
3.15	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6
3.16	Bloque	HIWIN Modelo HGW-15CC	2
3.17	Portanuez	Acero SAE 1020	1
3.18	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	32
3.19	Nuez	-	1
3.20	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
3.21	Golilla M10	ZINC	8
3.22	TUERCA HEX. T8 M5	Zinc	34
3.23	GOLILLA PL-PRE M5	Zinc	34
3.24	Acoplamiento	L75	1
3.25	Tornillo Cruz M5	-	4

4.3.2 Sistema de Extrusión

El sistema de extrusión se desglosa en los siguientes subsistemas.

4.3.2.1 Porta extrusor

La Figura 4-28 muestra una vista explosionada del subsistema “Porta Extrusor”. Para una mejor comprensión de la imagen, fueron omitidos la gran mayoría de los elementos de sujeción y solo se deja una muestra de cada uno de los elementos utilizados en todo el subsistema. De todas formas, en la Tabla 4-12 se muestra un listado de las piezas que conforman el Porta Extrusor, y en ella se detalla la cantidad de cada pernos, tuercas y golillas empleados como elementos de sujeción.

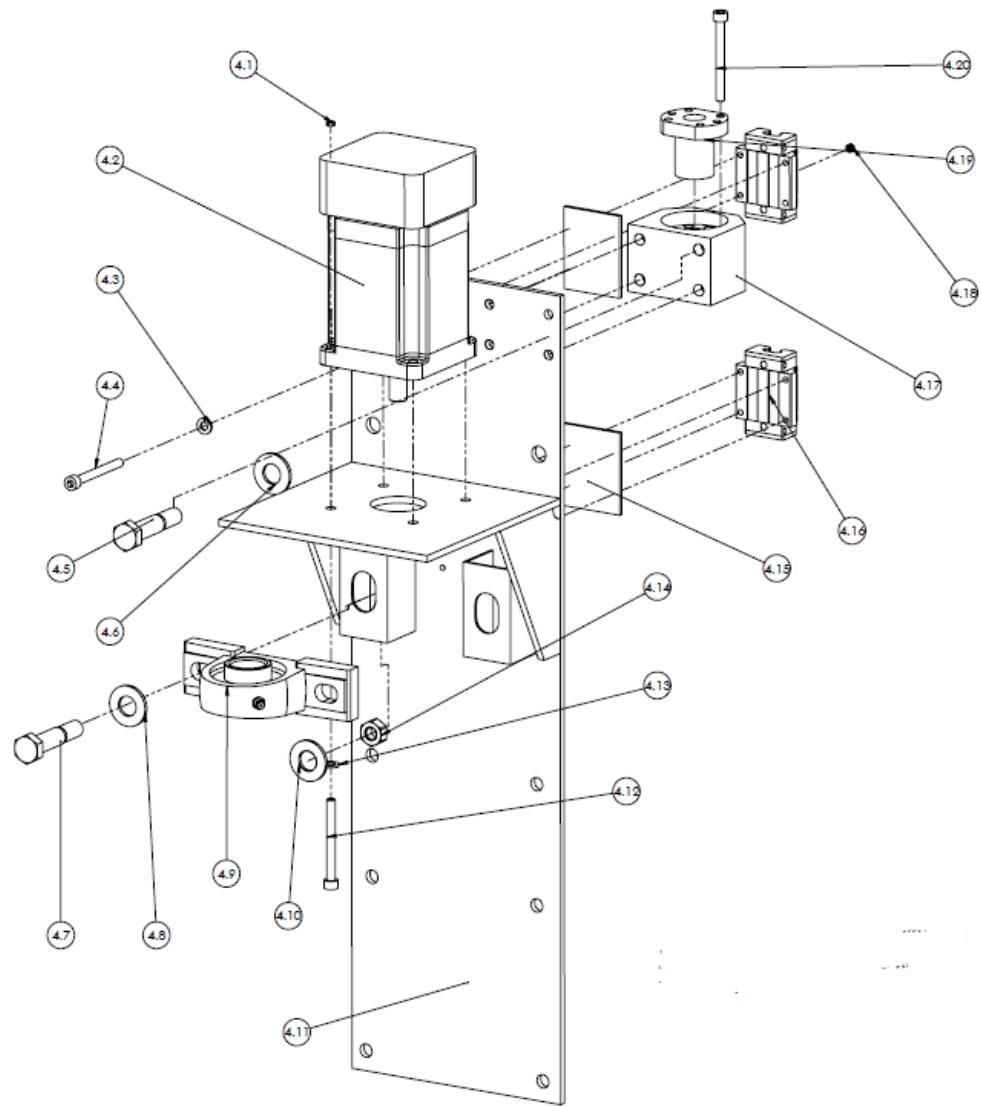


Figura 4-28 Explosión del subsistema Porta Extrusor Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-12 Lista de piezas que componen del subsistema Porta Extrusor. Fuente: Elaboración propia

Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
4.1	Tuerca Hex M5	Zinc	4
4.2	Motor de extrusión	-	1
4.3	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	16
4.4	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	8
4.5	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
4.6	Golilla M10	ZINC	4
4.7	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
4.8	Golilla M10	ZINC	4
4.9	Rodamiento c/sorte	UCP201	2
4.10	Golilla M10	ZINC	8
4.11	Estructura principal	Ver planos 4-D y 4-E	1
4.12	Tornillo Cruz M5	-	4
4.13	Golilla Hex M5	Zinc	4
4.14	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
4.15	Placa niveladora	Acero A36 5mm	2
4.16	Bloque	HIWIN Modelo HGW-15CC	2
4.17	Portanuez	Acero SAE 1020	1
4.18	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	8
4.19	Nuez	-	1
4.20	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6

4.3.2.2 Extrusor

La Figura 4-29 muestra una vista explosionada del subsistema “Extrusor”. Para una mejor comprensión de la imagen, fueron omitidos la gran mayoría de los elementos de sujeción y solo se deja una muestra de cada uno de los elementos utilizados en todo el subsistema. De todas formas, en la Tabla 4-13 se muestra un listado de las piezas que conforman el Extrusor, y en ella se detalla la cantidad de cada pernos, tuercas y golillas empleados como elementos de sujeción.

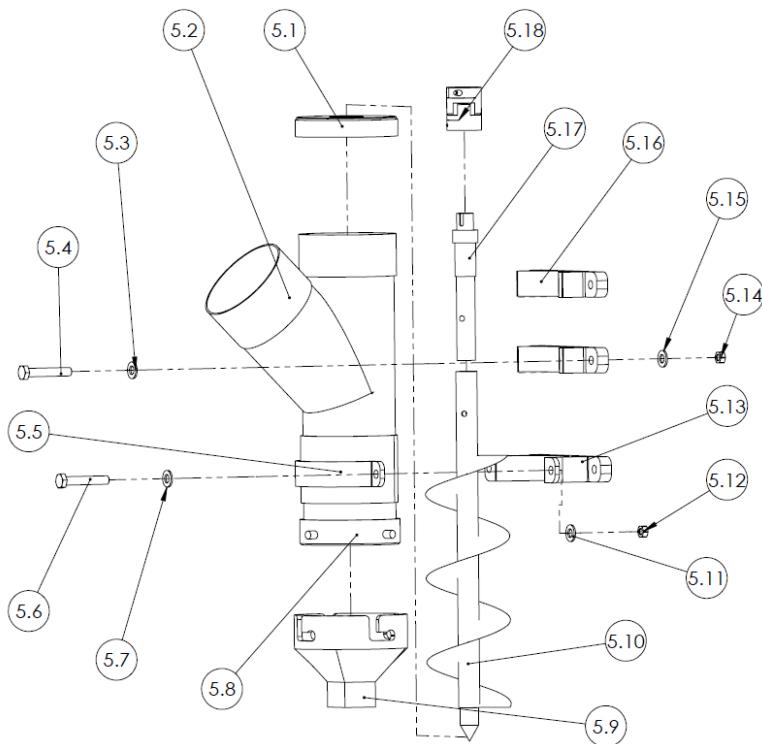


Figura 4-29 Explosiónado del subsistema Extrusor Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-13 Lista de piezas que componen del subsistema Extrusor. Fuente: Elaboración propia

Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
5.1	Tapa	PVC Ø110	1
5.2	Carcasa	Ensamblés de PVC	1
5.3	Golilla M10	ZINC	6
5.4	PERNO HEX. 8.8 M10 X 30	ZINC	6
5.5	Cintillo delantero	PLA	1
5.6	PERNO HEX. 8.8 M10 X 25	ZINC	2
5.7	Golilla M10	ZINC	2
5.8	Porta boquilla	PLA	1
5.9	Boquilla	PLA	1
5.10	Barreno	Elem. comercial modificado	1
5.11	Golilla M10	ZINC	2
5.12	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	2
5.13	Soporte inferior	PLA	1
5.14	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	6
5.15	Golilla M10	ZINC	6
5.16	Soporte superior	PLA	2
5.17	Eje de acople	SAE1020	1
5.18	Acoplamiento	L-75	1

4.4 Fabricación y Ensamblaje

En la sección de Anexos se encuentra una cubicación de las piezas empleadas para la fabricación de este proyecto.

La Figura 4-30 muestra el proceso de impresión 3D de la pieza “porta boquilla”. Fue realizado en PLA, con un 50% de relleno, además de tres capas internas de material para un mejor rendimiento mecánico de la pieza. La Figura 4-31 muestra la pieza finalizada.

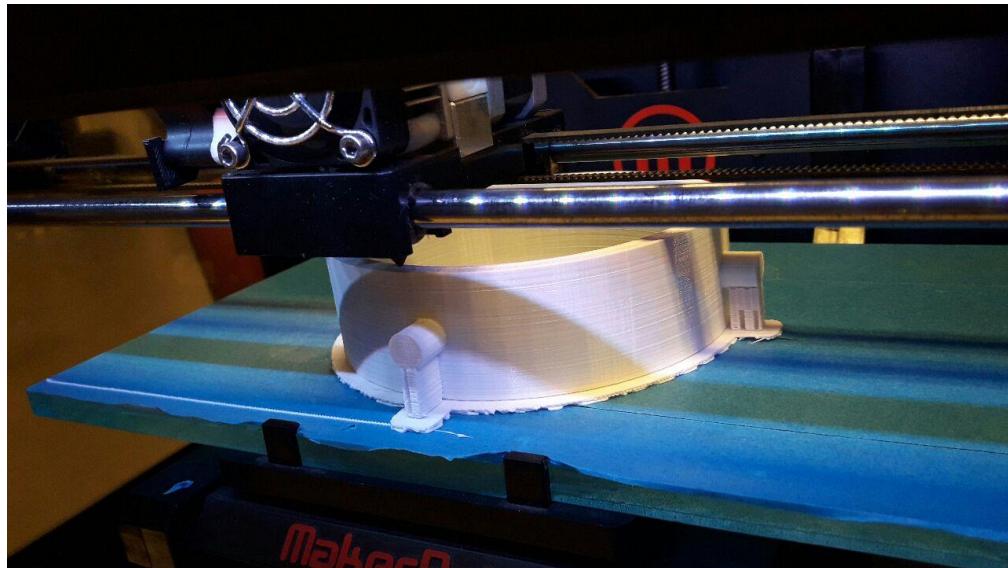


Figura 4-30 Impresión de la pieza "Porta Boquilla" en dependencias del FabLab. Fuente: Elaboración propia

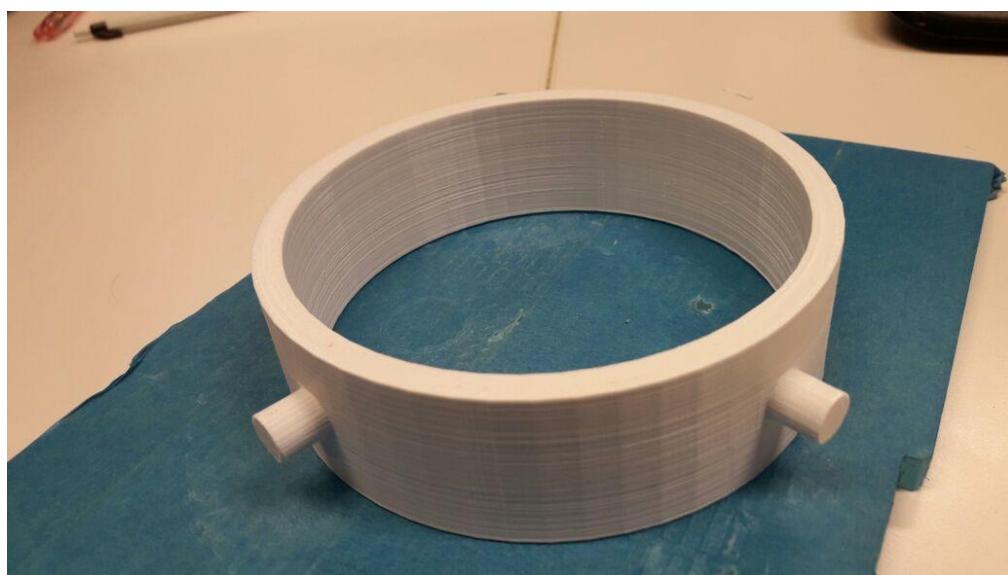


Figura 4-31 "Porta Boquilla" acabada. Fuente: Elaboración propia

De manera similar, y con los mismos parámetros de impresión, se fabricó la boquilla, mostrada en la Figura 4-32, y el cintillo con el soporte del extrusor, mostrada en la Figura 4-33.

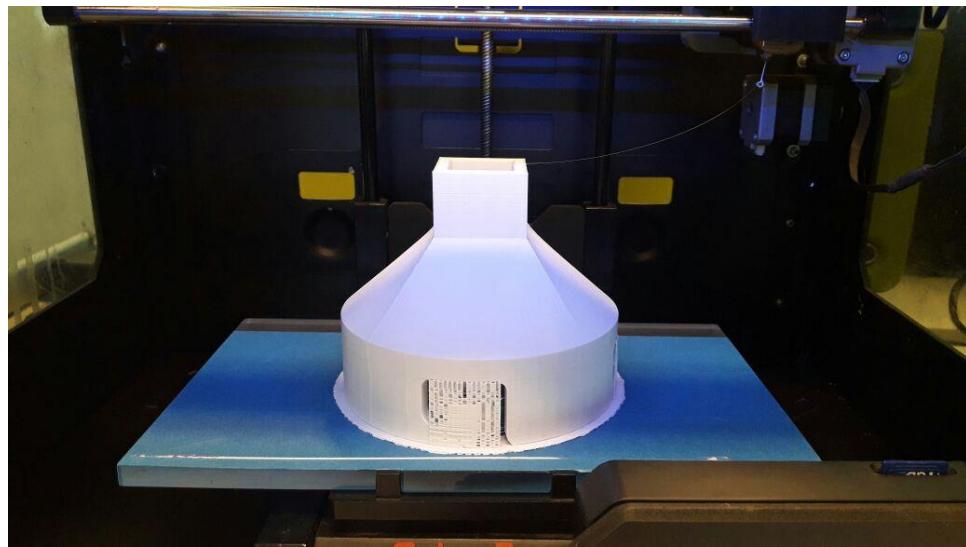


Figura 4-32 Boquilla finalizada. Fuente: Elaboración propia

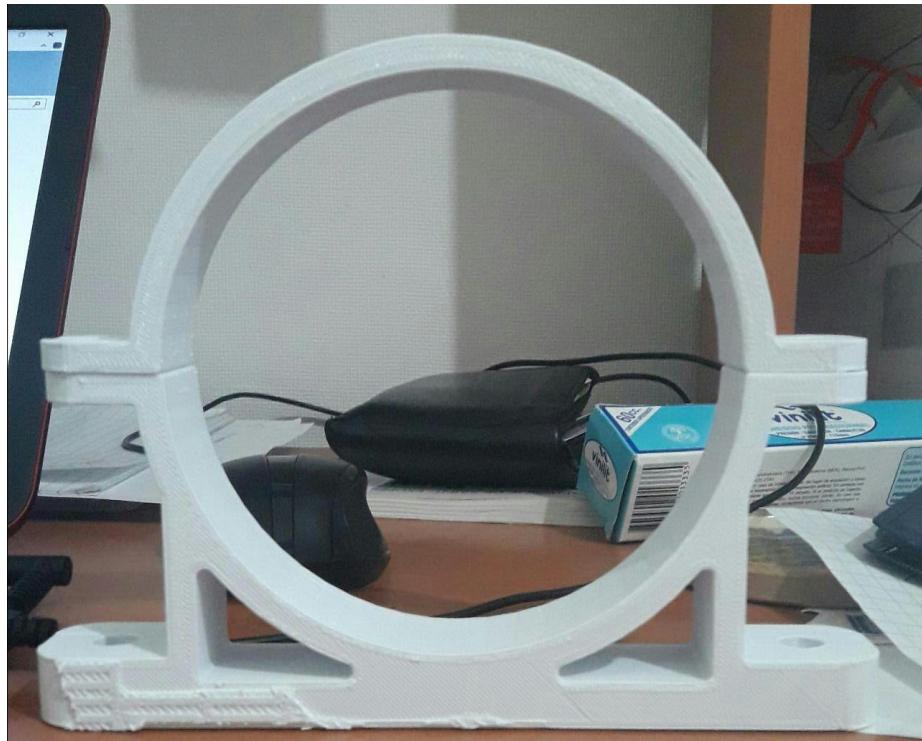


Figura 4-33 Soporte inferior y Cintillo finalizados. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-34 muestra los componentes que forman parte de la carcasa del extrusor, realizado con tubos de PVC sanitarios de diámetro nominal 110mm, además de las piezas fabricadas con PLA. Toda ellas fueron ensambladas con el adhesivo *vinilit*.



Figura 4-34 Componentes del extrusor previo a su ensamblaje. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-35 muestra el proceso de ensamblado del subsistema “Base”, previo a la soldadura de las aristas.



Figura 4-35 Presentación previo al ensamblaje de las piezas del subconjunto Base. Fuente: Elaboración propia

Las pestañas de refuerzo y las placas laterales que forman parte del subsistema Puente fueron unidas con cordones de soldadura de MIG (Ver Figura 4-36), al igual que el resto de las piezas metálicas.



Figura 4-36 Detalle de la placa lateral del subsistema puente. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-37 se muestran las piezas de la impresora previas a ser ensambladas.



Figura 4-37 Subsistemas de la impresora. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-38 muestra el sistema de extrusión ensamblado, previo a ser probado. Por otro lado, la Figura 4-39 muestra el aludido sistema, montado en la estructura de pruebas. Dicha estructura es una fabricación menor de la cual no se tienen planos. Su objetivo es solamente sostener el extrusor de manera vertical.



Figura 4-38 Extrusor y porta Extrusor. Fuente: Elaboración propia



Figura 4-39 Estructura de pruebas del extrusor. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-40 muestra el proceso de pintado tanto del sistema de extrusión como la estructura de pruebas. La Figura 4-41 muestra la estructura de pruebas finalizada. Se le agregó un grado de libertad para poder desplazar el extrusor verticalmente y ruedas para un desplazamiento horizontal continuo. También, se le agrega una pequeña mesa para incorporar los dispositivos electrónicos, además del computador, del cual recibe las instrucciones de extrusión.



Figura 4-40 Pintado del extrusor y estructura de pruebas. Fuente: Elaboración propia



Figura 4-41 Sistema de extrusión y estructura de pruebas finalizado. Fuente: Elaboración propia

4.5 Pruebas

Las pruebas fueron divididas en tres fases: la prueba del sistema de extrusión y la prueba del sistema de desplazamiento, los que en su total conforman las pruebas del tipo mecánicas y la prueba impresión de concreto.

4.5.1 Pruebas en el sistema de extrusión

Para llegar a los diversos tipos de hormigones que se utilizaron en los ensayos, se empleó un método iterativo: partiendo de una mezcla tentativa, se comienza a agregar agua, concreto o arena según sea necesario, hasta llegar a una mezcla relativamente densa, capaz de sostenerse a sí misma por medio de capas una vez extruido (Ver Figura 4-39). Si el hormigón no es capaz de sostenerse a sí mismo, se vuelven a agregar nuevos componentes y nuevamente se extruye, y así sucesivamente.

A su vez, las pruebas del sistema de extrusión fueron divididas en dos: la prueba estática, y la prueba del desplazamiento frontal. La Figura 4-40 muestra el espacio de pruebas para realizar extrusiones de hormigón de manera estática.



Figura 4-39 Uno de los hormigones utilizados para las pruebas. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-42 muestra los resultados obtenidos a partir de una extrusión con hormigón de bajo porcentaje de agua en la mezcla total. En este ensayo, es posible ver que por el contorno del porta-boquilla, existe una fuga de agua, el cual se busca corregir posteriormente sellando con un o-ring modificado.

Por otro lado, en la Figura 4-43 se ve un ejemplar de ensayo con un hormigón cuyo porcentaje de agua en la mezcla es mayor al del ensayo anterior. En esta ocasión, si bien la extrusión tiene la forma cuadrada de la boquilla, este no llega a tener la capacidad de sostenerse per se.



Figura 4-40 Banco de pruebas estático. Fuente: Elaboración propia



Figura 4-42 Extrusión de hormigón con bajo porcentaje agua/cemento. Fuente: Elaboración propia



Figura 4-43 Extrusión de hormigón con alto porcentaje agua/cemento. Fuente: Elaboración propia

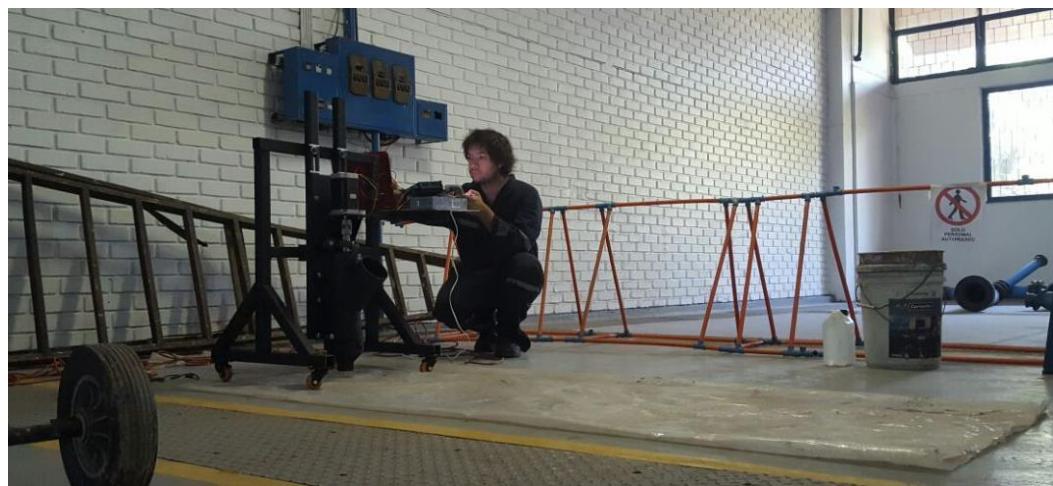


Figura 4-44 Montaje de pruebas de extrusión con desplazamiento. Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-44 muestra la instalación de pruebas para ensayos de extrusión con desplazamiento frontal. En la Figura 4-45 se ve una muestra de extrusión con

desplazamiento empleando un hormigón de alto porcentaje de agua, mientras que la Figura 4-46 muestra un ensayo realizado con hormigón de bajo porcentaje de agua.



Figura 4-45 Muestra de extrusión con hormigón de bajo porcentaje Agua/Concreto. Fuente: Elaboración propia

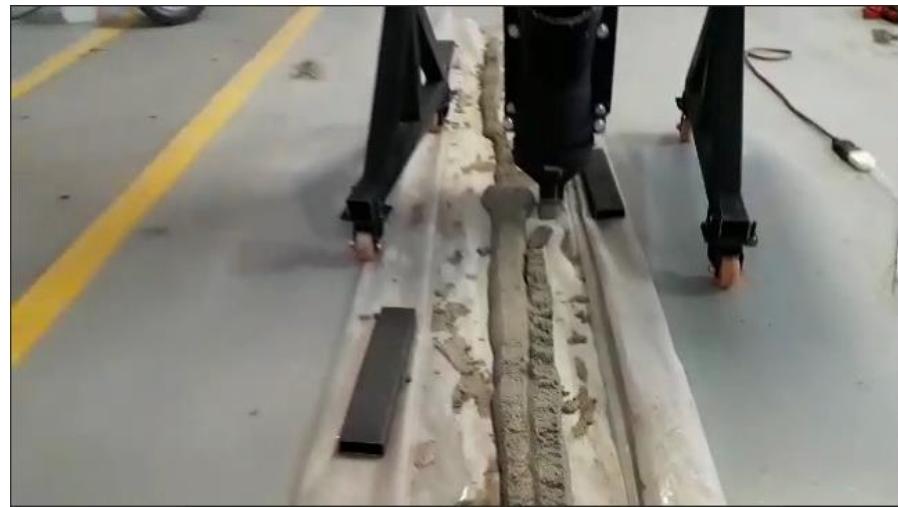


Figura 4-46 Muestra de extrusión con hormigón de alto porcentaje Agua/Concreto. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en consideración ambos extremos de hormigones admisibles para la impresión 3D (alto porcentaje de agua v/s bajo porcentaje de agua), se puede asegurar que el extrusor supera con satisfacción las pruebas aisladas, tanto estáticas como en presencia de desplazamiento frontal.

4.5.2 Pruebas del sistema de desplazamiento

La Figura 4-47 muestra los subsistemas Puente, Mesa Horizontal, Porta Extrusor y Extrusor montados, al igual que sus respectivos motores. Una vez realizado el montaje de cables, y con la ayuda del software Rapetier-Host, se realizan desplazamientos lineales de forma manual en cada uno de los ejes disponibles (x, z), con el objetivo de calibrar las pulsaciones por minuto del firmware, se ordenan desplazamientos de 100mm, y se contrasta con el desplazamiento real de la máquina. Si difieren entre ellas, se modifican dichas pulsaciones hasta que la maquina en la realidad se desplace los 100mm ordenados.



Figura 4-47 Puente, Mesa Horizontal, Porta Extrusor y Extrusor montados, con sus respectivos motores. Fuente: Elaboración propia.

Una vez calibrada, se realiza una simulación de impresión de una pared, sin la incorporación del material, con el objetivo de presenciar su comportamiento. Para ello, se crea un archivo CAD en Solid Edge (Figura 4-48), de una simple pared de 600mm de ancho, 400mm de alto, y 30mm de largo, la que luego se convierte en formato *.stl, para ser leída posteriormente por el programa que controla la impresora.

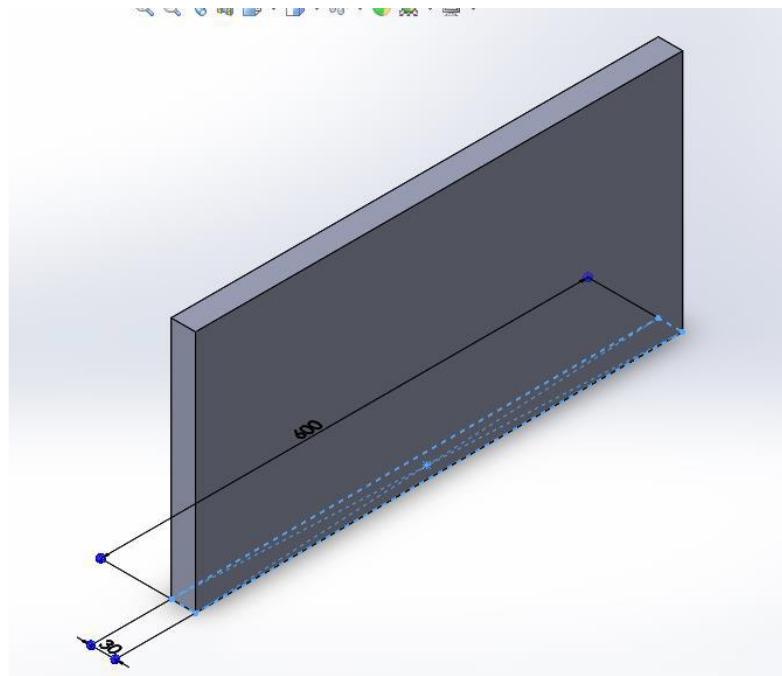


Figura 4-48 Pared de pruebas de desplazamiento

Una vez llevado al software, se ordena la traducción de las instrucciones a lenguaje G, para dirigir los desplazamientos de la máquina (Ver Figura 4-49).

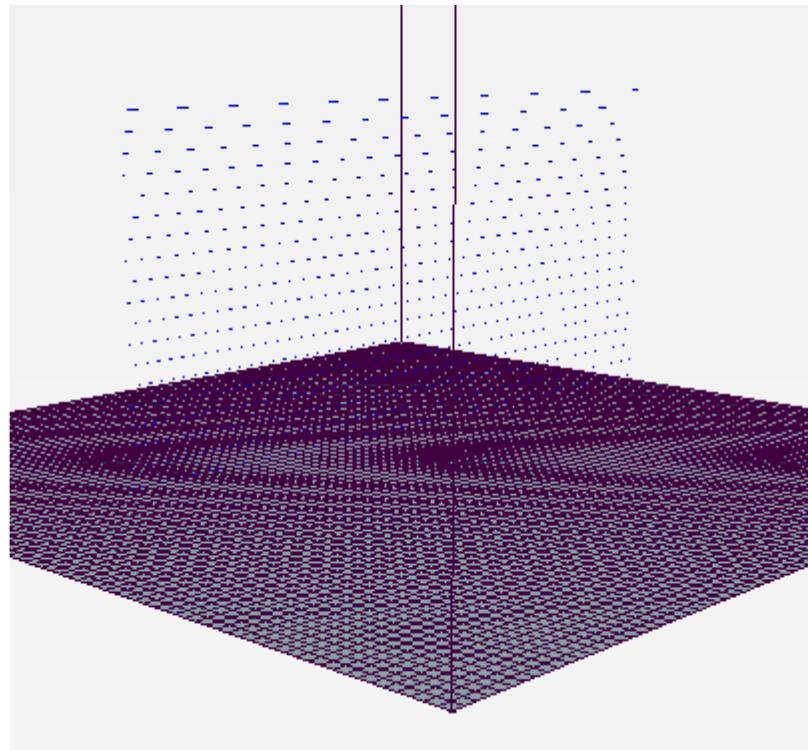


Figura 4-49 La misma pared, ahora en la interface de Repetier-Host

La Figura 4-50 muestra las pruebas de desplazamiento realizadas en el taller mecánico. Estas cumplían a cabalidad las instrucciones ordenadas, sin embargo, se evidenció una gran cantidad de vibraciones, mayoritariamente a la hora transportar la

máquina a su origen. Dichas vibraciones se localizaban principalmente en la zona del acoplamiento del eje de desplazamiento en z.

Por otro lado, se realiza una calibración de la velocidad de extrusión de material, configurado desde el software, hasta llegar a una velocidad adecuada, según un criterio apreciativo.



Figura 4-50 Pruebas mecánicas de desplazamiento

Salvo aquel desperfecto de las vibraciones, se confirma un rendimiento relativamente correcto de la impresora, tanto en el desplazamiento en X, Z y el movimiento del extrusor. En la sección de Conclusiones, se hace una evaluación de las posibles causas de aquellas vibraciones y cómo corregirlas.

4.5.3 Pruebas de impresión de concreto.

Para realizar las pruebas con el hormigón, se realiza una mezcla promedio obtenida a partir de los resultados del trabajo de título del compañero de Ingeniería Civil, dicha mezcla está conformada con los siguientes componentes, y sus respectivos porcentajes de presencia en la mezcla:

- 30% Cemento
- 60% Arena Fina
- 10% Agua
- 1% del peso del Cemento en SuperPlastificante.
- 1% del peso del Cemento en Acelerante.

Esta mezcla puede apreciarse cualitativamente en la Figura 4-51.



Figura 4-51 Aspecto de la mezcla a extruir. Fuente: Elaboración propia

De modo similar a las pruebas de desplazamiento hechas previamente, se realiza la misma pared, de dos maneras distintas: una tiene una altura de entre capas de 15mm (Experimento A), mientras que la otra tiene una altura entre capas de 30mm (Experimento B), se realizan estas dos pruebas para comprobar que la máquina obedece un cambio de instrucciones simple, aunque es posible realizar una gran cantidad de otras configuraciones, como velocidades de desplazamiento, de extrusión, escalado del sólido, etc .

La Figura 4-52 muestra una simulación de lo que sería la trayectoria de desplazamiento del extrusor, tanto para el Experimento A como al Experimento B, acompañado de sus respectivas estadísticas de impresión.

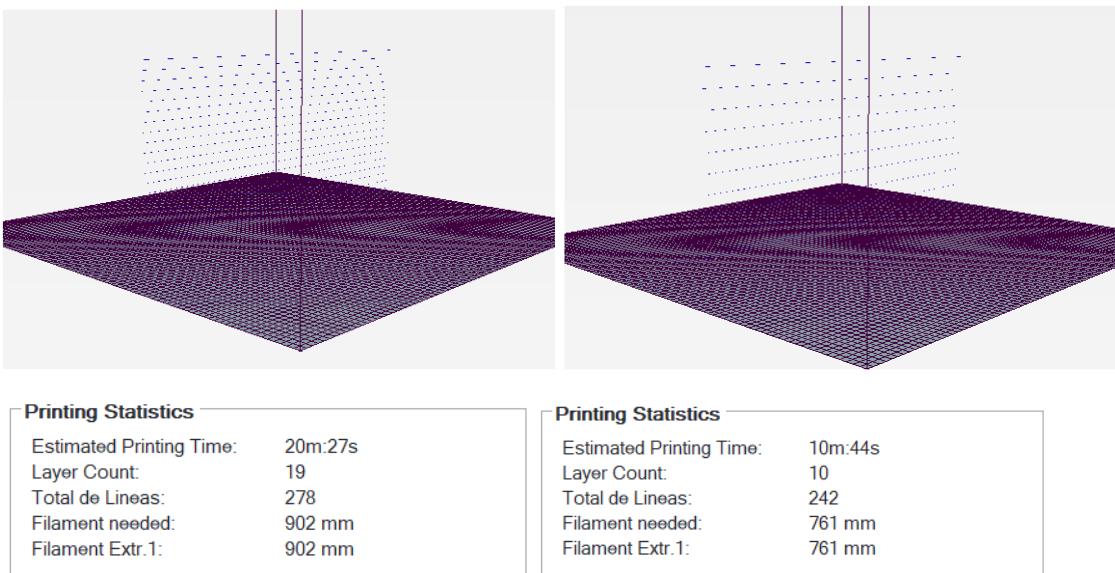


Figura 4-52 Izquierda: Experimento A y sus estadísticas de impresión. Derecha: Experimento B y sus estadísticas de impresión. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 4-53 muestra las primeras 6 capas de la pared impresa en el experimento A, mientras que la Figura 4-54 muestra las primeras 6 capas de la pared impresa en el experimento B.



Figura 4-53 Pared resultante del Experimento A. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-54 Pared resultante del Experimento B. Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4-55 muestra la pared impresa para ambas experiencias, en las dos ocasiones, el largo de la pared resultó ser de aproximadamente 660mm de largo, 60mm más que los entregados en las instrucciones. Para ambos casos, fue utilizado el mismo concreto, la diferencia en sus aspectos reside en el tiempo que pasó entre un ensayo y el otro, el cual terminó por secar la mezcla en cuestión.



Figura 4-55 Detalle del largo de la pared extruida, de 660 milímetros aproximadamente para ambos experimentos (Arriba: Experimento A, Abajo: Experimento B). Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 4-56 muestra en detalle el espesor resultante para ambas experiencias. El experimento A mostró una pared más ancha, llegando a medir incluso 90mm en su base, tres veces más espeso que la boquilla de extrusión. Por otro lado, el Experimento B muestra una pared más esbelta, cuyo espesor permanece relativamente constante en todas las capas, de aproximadamente 35mm, solo 5 milímetros más espeso que la salida de la boquilla del extrusor.



Figura 4-56 Detalle del espesor de la pared para ambos experimentos (Izquierda: Experimento A, Derecha: Experimento B). Fuente: Elaboración Propia.

Para ambos experimentos, las vibraciones perceptibles en las pruebas de desplazamiento no parecieron agravarse. Sin embargo, tampoco lograron atenuarse, sobre todo en la zona que respecta el acoplamiento del desplazamiento en Z.

5 Conclusiones

De la ingeniería conceptual.

Este proyecto no habría podido ser realizado en el tiempo y con el presupuesto disponible, de no haber sido por la gran cantidad de material y referencias que es posible encontrar en internet hoy en día. Desde el extrusor, que fue utilizado en base a un proyecto de tesis de una universidad sueca, hasta el sistema de desplazamiento, tomado de varias referencias del tipo “hágalo usted mismo”, el diseño de este proyecto consistió básicamente en la adaptación de ambos sistemas, en el contexto actual de los objetivos de este proyecto.

De la ingeniería de detalle.

Se encontraron dificultades a la hora de seleccionar elementos mecánicos debido a la poca familiarización con los catálogos de dichas partes. Sin embargo, esta debilidad fue superada gracias al desarrollo de este proyecto, entregando nuevas competencias para enfrentar el ámbito profesional.

Del refinamiento de la ingeniería Conceptual.

Se comprueba que los elementos de sujeción pueden llegar a cambiar notablemente las piezas involucradas, por lo que es necesario considerarlos tempranamente a la hora de diseñar, asimismo una vez seleccionado dichos elementos de sujeción, resulta importante considerar si estos pueden ser montados en la práctica, o si estos resultan cómodos para quienes lo ensamblen, agregando más factores a considerar a la hora de diseñarlos.

Por otro lado, en la fase de detalle entran otras nuevas variables a considerar, como los procesos de manufactura y los costos asociados a las partes en cuestión.

De la implementación del diseño.

Como gran resultado final, es posible concluir que se cumplen los parámetros de diseño impuestos al inicio de este proyecto, por lo que el prototipo queda a disposición de los interesados para su perfeccionamiento y/o actualización.

Se comprueba que es perfectamente factible crear sistemas mecánicos innovadores orientados a la solución de problemas de vanguardia en el contexto de un trabajo de título. Existe tanto capacidad técnica, como teórica, además de presupuestaria para crear proyectos interdisciplinarios entre estudiantes de la facultad. Los que juntos pueden potenciarse y proponer ideas creativas y que atiendan a problemáticas reales.

A lo largo del proceso de construcción, hubo un aprendizaje de los procesos de manufactura y la utilización de herramientas de trabajo que el alumno adquirió en primera persona mientras trabajaba en las dependencias del taller mecánico y le laboratorio de fabricación digital. A eso, agregar que el alumno adquirió nociones de trabajos bajo normas de seguridad, además del constante uso de los elementos de protección personal.

En su totalidad, desde las primeras cotizaciones hasta el fin de la construcción, el proyecto duró 9 meses y requirió de una inversión de \$1.200.000 por parte de Beauchef Proyecta, además de \$300.000 aportados por el departamento de Ingeniería Mecánica.

De los errores de diseño.

El proyecto posee una serie de errores de diseños, varios de ellos poco relevantes. Sin embargo, es necesario destacar tres de los más importantes y que son recibidos como parte del aprendizaje académico de este proyecto.

- Error en el diseño de maquineado en uno de los extremos de los tornillos de potencia: Debido a una mala visualización a la hora de hacer el ensamblaje computacional, no fue posible ver que en uno de los extremos de cada tornillo de potencia (vertical, horizontal y frontal) existía un diámetro de 12mm entre dos diámetros mayores (14mm por un extremo, y el tornillo en sí por el otro extremo) destinado para el rodamiento, lo que impedía el paso del cojinete a su posición diseñada. El problema era solucionable si se reducía el diámetro de 14 a 12, para que pudiera pasar el rodamiento, sin embargo, por aquel extremo, se montaba un acoplamiento cuya perforación es de 14mm. La solución propuesta para este error

de diseño fue llenar el agujero del acoplamiento y hacer una nueva perforación, esta vez de 12mm o menor. Sin embargo, esta pieza que se suelda podría no rendir de la manera esperada.

- Error en el montaje de los rieles horizontales y verticales: El problema de estos rieles es que están sujetos a perfiles cuadrados de 40mm de espesor, si a eso, se le agregan los 16mm adicionales que necesitan los pernos, solo para atravesar el riel, además de la respectiva tuerca que sostiene el otro extremo y las golillas necesarias, se necesita que los pernos Parker tengan a lo menos 66mm de largo y 4mm de diámetro. En el mercado es muy difícil encontrar pernos Parker de tales dimensiones, y esto no fue considerado a la hora de diseñar las piezas, debido a la poca experiencia del alumno. Afortunadamente, fue posible encontrar pernos que se adapten a los requerimientos impuestos, sin embargo se debió incurrir en un costo relativamente elevado.
- Errores en el protocolo post-impresión: Después de realizar la primera impresión, no se realizó una limpieza inmediata del material residual dentro del extrusor, por lo que a la hora de hacer la segunda experimentación, existía un estancamiento de material y la extrusión no se realizaba. Al intentar desmontar la boquilla, esta se quebró y debió haber sido reparada con alambres, con el fin de terminar las experiencias (Ver Figura 5-1) Esta serie de errores en cadena se pudo haber evitado si se hubiese realizado la limpieza de la boquilla de manera inmediata. De igual forma, existe confinamiento de material en el borde entre el extrusor y el cuello de la boquilla, por lo que también existe un error de tolerancias en dicha zona.



Figura 5-1 Boquilla rota. Fuente: Elaboración propia.

De las limitantes y mejoras sugeribles.

Actualmente, el proyecto presenta una serie de limitantes detalladas a continuación:

- Pocos sensores. Si se piensa como un dispositivo para hacer experimentación, la impresora debe contar con sistemas de medición, tanto de la muestra como de la atmósfera de trabajo. Queda propuesta la incorporación de cámaras, sensores de humedad, temperaturas, además de la capacidad de regular la presión de eyección del material, entre otros.
- Capacidad de transporte. Debido al peso de la impresora, este hace complejo su transporte y operación en ambientes externos. Principalmente por la complejidad de re calibrar el conjunto, además de su alto peso y volumen. Se propone la construcción de un banco de pruebas que complemente este equipo.
- Lubricación y Aislación. Actualmente, tanto rieles como tornillos de potencia están expuestos a material particulado, así como el hormigón propiamente tal. Se propone una lubricación de dichos elementos mecánicos, así como una aislación del ambiente externo por medio de fuelles.
- Protección de la corrosión. El hormigón posee un porcentaje de agua, por lo tanto existe riesgo de oxidación de las partes metálicas que interactúen con la mezcla. Se sugiere un pintado general de dichas partes, para prolongar la vida útil del equipo.
- Vibraciones. El equipo presenta vibraciones que aparentemente son despreciables dada su poca magnitud. Sin embargo, existe una que, aparte de producir mucho ruido, llega a solar un prisionero asociado al acoplamiento del desplazamiento en z. Esta vibración se presenta cuando se busca llevar el extrusor a su origen, el cual suele ser un desplazamiento más lento que cuando se ordena la impresión. Se sugiere probar dicho desplazamiento en distintos rangos de velocidad, así como lubricar el tornillo mecánico asociado.
- Cables desordenados. Se recomienda elaborar un gabinete que permita aislar los componentes eléctricos del ambiente, además de ordenar de mejor manera los cables, ya que, hasta el momento, presentan riesgos de quedar enganchados en partes de la impresora mientras hay un desplazamiento del extrusor. Se recomienda incorporar canaletas flexibles que dirijan el desplazamiento de los cables.

Ahora bien, una vez superadas las limitantes detalladas anteriormente, entre las futuras proyecciones de esta impresora 3D de hormigón se destacan.

- Autonomía. El proyecto, en la actualidad, carece de un dispositivo de inyección de material que le permita tener una autonomía de trabajo. El operario tiene que estar constantemente supervisando si el extrusor tiene el material necesario para imprimir, por lo que reiteradamente se tiene que aportar material, lo que implica una detención continua del proceso de impresión. Debido a las restricciones presupuestarias, fue imposible incorporar un sistema de inyección de concreto.

- Crear nuevas boquillas con diferentes geometrías de extrusión (redondas, elípticas, estriado, etc) las cuales permiten diversificar los experimentos que se puedan realizar en el equipo.
- Modificación del extrusor para permitir agregar un segundo material. Un ejemplo sería incorporar un estanque de fibra de algún polímero, que incorpore dicho material al hormigón justo antes de salir eyectado por la boquilla.
- Limitante de espacio. Debido a una restricción presupuestaria, además de los procesos de manufactura con los que se cuenta, la impresora posee un volumen de trabajo menor al metro cúbico, por lo que solo es posible realizar ensayos de hormigones menores.
- Reconocimiento de imágenes para contrastar el producto final resultante de la impresión, versus el archivo CAD introducido en el software. Este debe venir acompañado de un algoritmo de comparación y similitud en tres dimensiones, así como un escáner de la imagen para re-transformarla en un archivo CAD.

6 Bibliografía

- [1]Aldricnegrier. (9 de Junio de 2016). *Instructables*. Obtenido de Instructables: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Controlled-CNC-3D-Printer/>
- [2]Anell, L. H. (2015). *Concrete 3d printer*. Lund: Lund University.
- [3]Apis Cor. (1 de Enero de 2016). *Apis Cor*. Obtenido de Apis Cor: <http://apis-cor.com/en/about/who-we-are>
- [4]Azzarello, N. (28 de Agosto de 2014). *Andrey Rudenko constructs 3D printed concrete castle in minnesota*. Obtenido de designboom: <https://www.designboom.com/technology/3d-printed-concrete-castle-minnesota-andrey-rudenko-08-28-2014/>
- [5]Bernasconi, A. (Marzo de 2016). *Introduction to Optimum Design, Class 1*. Milan, Lombardia, Italia: Politecnico di Milano.
- [6]Carabante, T. (12 de Diciembre de 2016). *La Tercera*. Obtenido de La Tercera: <http://www.latercera.com/noticia/plan-maestro-construccion-incluye-casas-hechas-impresora-3d/>
- [7]Escobar, C. (23 de Marzo de 2013). *impresoras3d.com*. Obtenido de impresoras3d.com: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102825479-breve-historia-de-la-impresion-3d>
- [8]Hambach, M. (2017). *Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste*. Augsburg: Elsevier.
- [9]Kazemian, A. (2017). *Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory*. Los Angeles: Elsevier.
- [10]LE, T. T. (2012). *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*. Loughborough: Loughborough University.
- [11]Lucía. (1 de Junio de 2016). *3D Natives*. Obtenido de 3D Natives: <https://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-concreto-01062016/>
- [12]Redacción Tecnología. (6 de Marzo de 2017). *El Espectador*. Obtenido de El Espectador: 6. <http://www.elespectador.com/tecnologia/esta-impresora-en-3d-puede-construir-una-casa-en-24-horas-articulo-683255>
- [13]Sanchez, A. (22 de Diciembre de 2015). *http://diwo.bq.com*. Obtenido de <http://diwo.bq.com>: <http://diwo.bq.com/impresoras-3d-cartesianas-vs-delta/>
- [14]THK. (s.f.). *Examples of Selecting a Ball Screw*. Tokyo.
- [15]4TOSOK. (s.f.). *DESIGN OF SCREW SHAFTS*. Tokyo.

7 Anexos

ANEXO A

Cubicación

ición Dispositivo extrusor de con

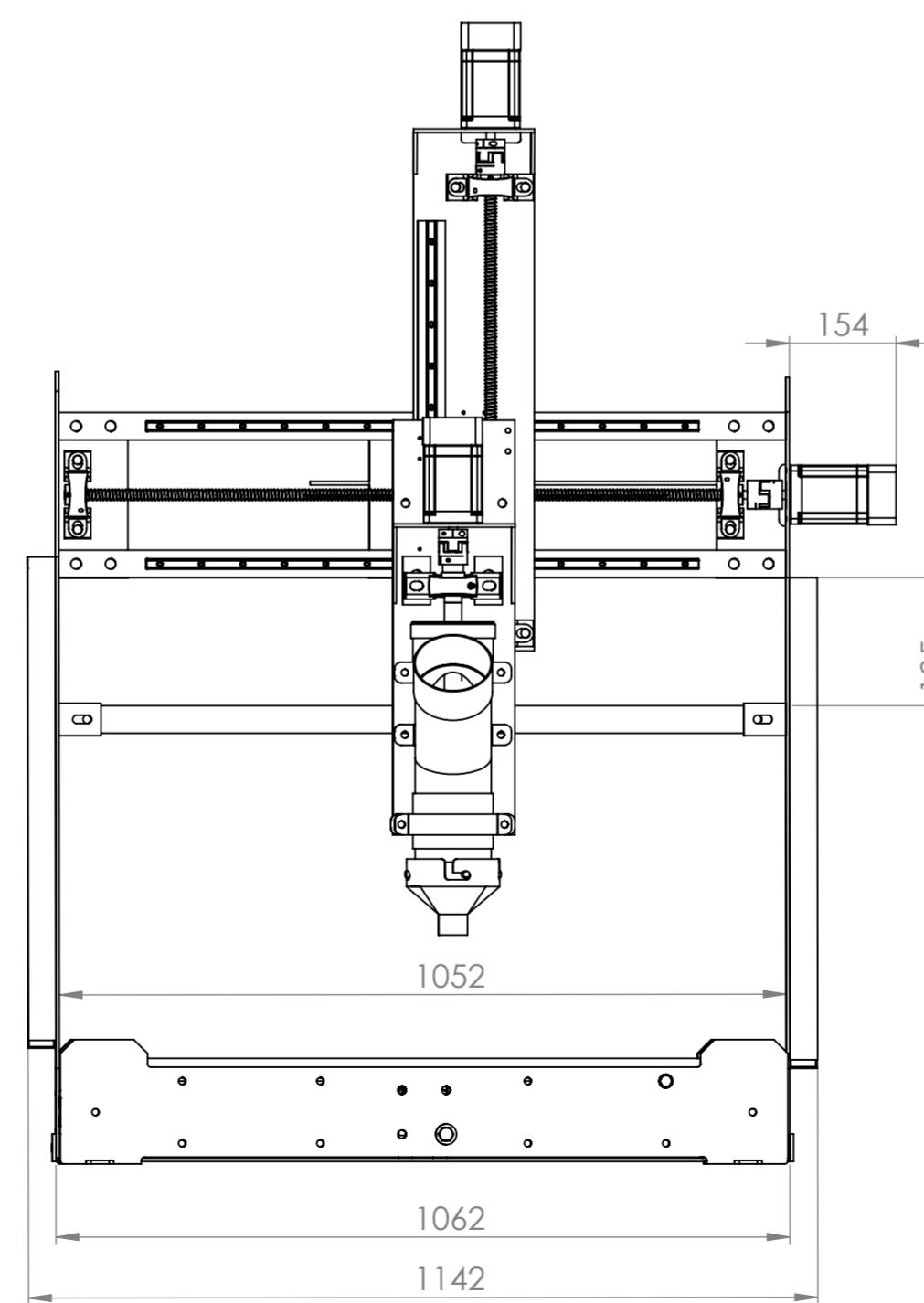
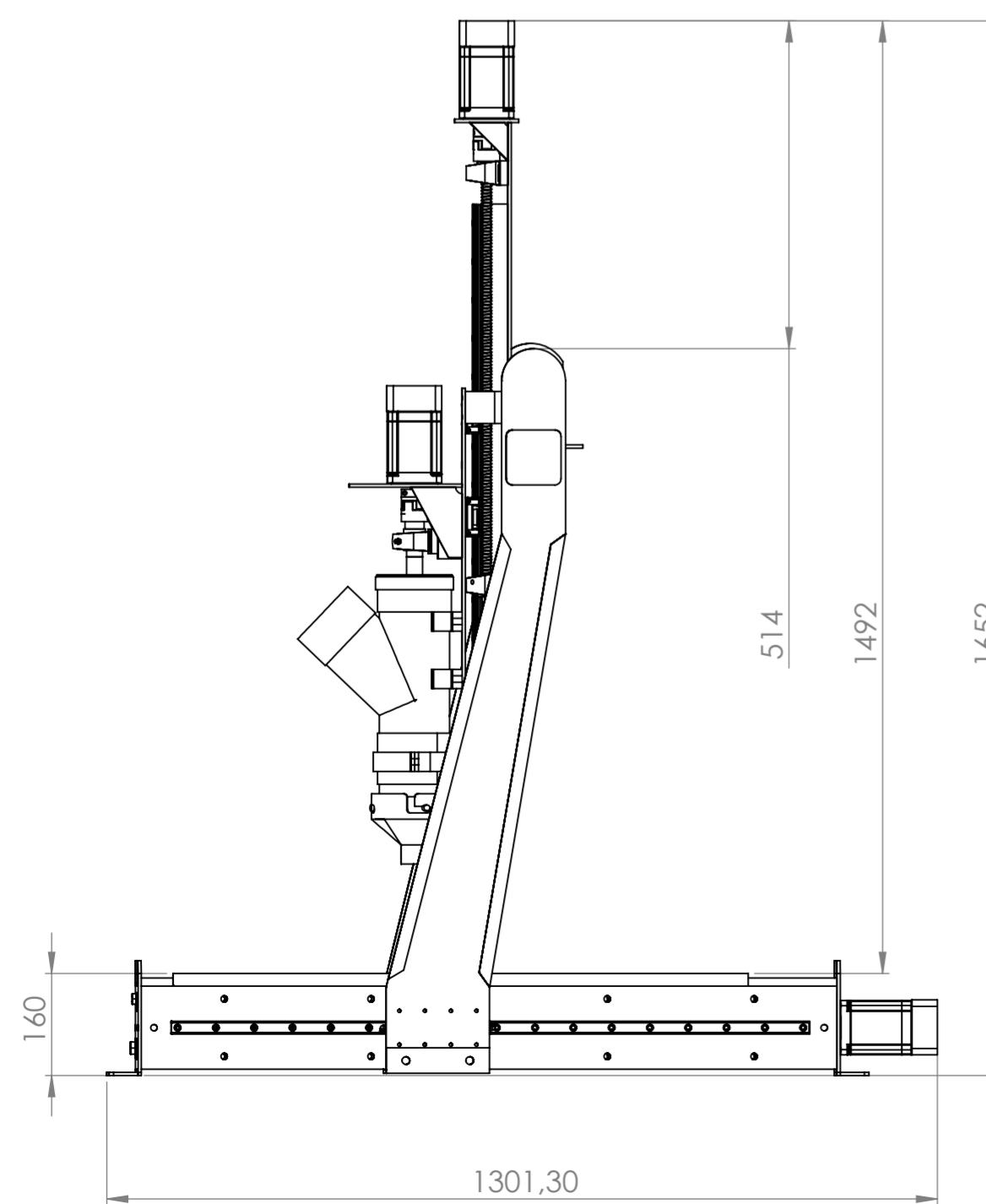
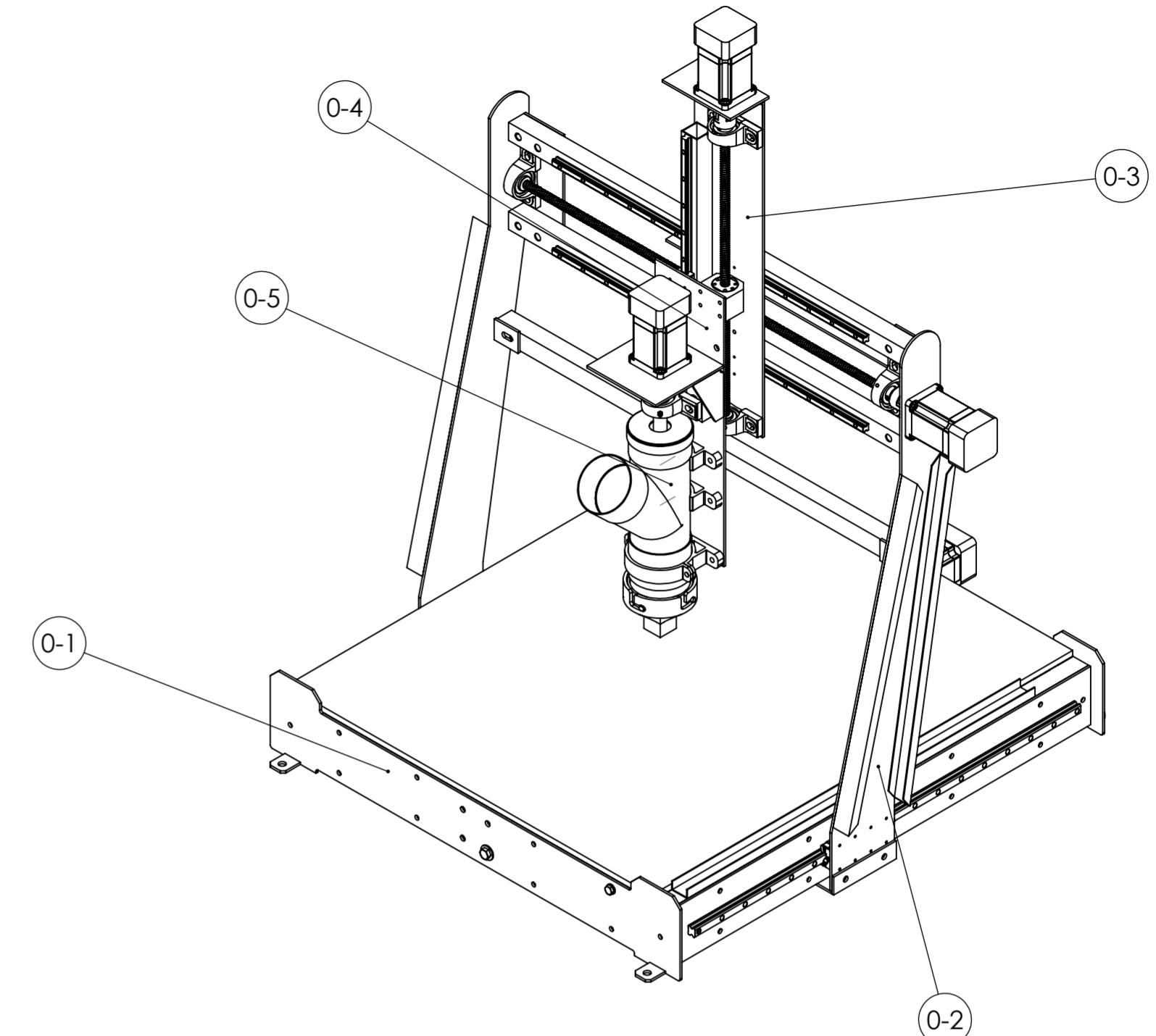
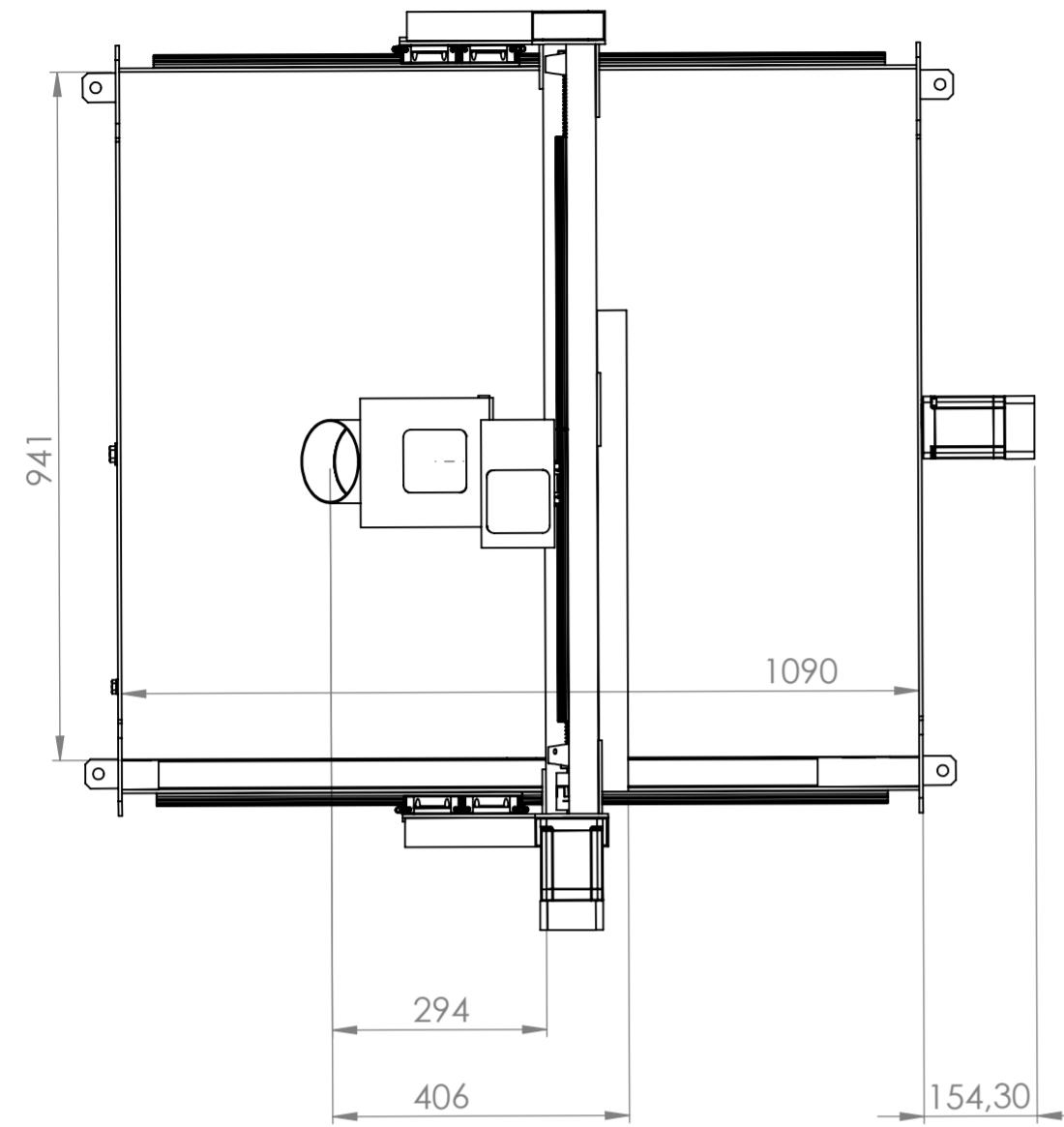
Proyecto: Dispositivo extrusor de Concreto
 Fecha: 18-11-2017
 Elaborado por: César Salazar Ibáñez

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	ANCHO (mm)	ESPESOR/diámetro (mm)	LARGO (mm)	LARGO TOTAL (mm)	ÁREA (m2)	PESO UNIT. (kg/m)	SUBTOTAL (kg)	MATERIAL	DESCRIPCIÓN MATERIAL	TOTAL
1	1											\$117.811
1.1	1	Acoplamiento L75	-	41,3	50	50	-	-	0,454	COMERCIAL	ACOPLAMIENTOS LOVEJOY TIPO L-075 NBR	\$14.671
1.2	1	Barreno	-	100	450	450	-	-	1,4	COMERCIAL	Barreno de Ahoyador modificado	\$29.990
1.3	1	Boquilla	-	135	110	110	-	-	0,25	PLA	Hecho en una impresora 3D	\$25.000
1.4	1	Eje Barreno-Acoplamiento	-	18,5	60	60	-	-	0,1	SAE1020		
1.5	1	Cintillo Mayor	-	55,5	80	80	-	-	0,067	PVC	Tubo de PVC cortado	0
1.6	1	Cintillo Menor	80	2	80	80	-	-	0,021	PVC	Tubo de PVC cortado	0
1.7	1	Tee PVC D110, 45°	-	110	270	270	-	-	0,318	PVC	Tee modificada	\$3.700
1.8	1	Porta Boquilla	-	119	30	30	-	-	0,073	PLA	Hecho en una impresora 3D	\$7.300
1.9	2	Soporte Fijo	170	30	47	47	-	-	0,125	PLA	Hecho en una impresora 3D	\$12.500
1.10	1	Soporte Radial Inferior	170	30	74	74	-	-	0,162	PLA	Hecho en una impresora 3D	\$16.200
1.11	1	Soporte Radial Superior	6	169	30	30	-	-	0,058	PLA	Hecho en una impresora 3D	\$5.800
1.12	1	Tapa PVC	-	110	30	30	-	-	0,067	PVC	Posee una perforación concéntrica de 4mm diam	\$500
1.13	1	Tubo corto Superior	-	110	50	50	-	-	0,07	PVC	Tubo de PVC cortado	0
1.14	1	Tubo Inferior Hembra	-	110	110	110	-	-	0,084	PVC	Tubo de PVC cortado	\$2.150
2	1											41650
2.1	2	Cuña nivel para bloques	47	2,7	61	61	2867	-	0,060766065	A36		
2.2	2	Escuadra Grande	80	5	110	110	0,006	39,3	0,216	A36		
2.3	1	Alma	176,5	5	600	600	0,1059	39,3	4,16187	A36		
2.4	1	Porta Motor de rotación barreno	176,5	5	176,5	176,5	31152,25	39,3	1,224283425	A36		
2.5	1	Porta Nuez	52	72	61	63	0,004536	7860	1,85395392	SAE1020		
2.6	4	Perno CAB HEX GR5 M6,5X25(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.7	8	Golilla M6,5(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.8	4	Tuerca CAB HEX GR5 M6,5 (Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.9	4	Perno CAB HEX GR5 M10X25 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.10	4	Golilla M10 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.11	8	Perno CAB HEX GR5 M4X25 (Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.12	8	Golilla M4 (Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.13	8	Perno CAB HEX GR5 M10X30 (Fijación Extrusor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.14	8	Tuerca HEX GR5 M10 (Fijación Extrusor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.15	16	Golilla M10 (Fijación Extrusor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
2.16	2	Bloques HIWIN HWG15CC	24	47	61,4	61,4	-	-	0,17	COMERCIAL	Importado desde China	\$41.650
2.17	1	Motor 85BYGH450C-060	86	86	151	151	-	-	5	COMERCIAL	Par de Retención 12KN. Disponible gratuitamente	\$0
2.18	1	Nuez HIWIN1605	-	-	48	42	42	-	-	COMERCIAL	Importado desde China	\$0
2.19	6	Tronillo Cruz GR5 M5X20 (Fijación Nuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3	1											92721
3.1	1	Alma mesa de desplazamiento en Y	175	5	750	750	0,13125	39,3	5,158125	A36		
3.2	2	Escuadra Chica	60	5	60	62	0,00186	39,3	0,073098	A36		
3.3	1	Porta motor de desplazamiento Z	100	5	175	176	0,0176	39,3	0,69168	A36		
3.4	1	Perfil Porta Rail	40	40	720	720	-	2,41	1,7352	A36		
3.5	1	Porta Nuez	52	72	61	63	0,004536	7860	1,85395392	SAE1020		
3.6	2	Bloques HIWIN HWG15CC	24	47	61,4	61,4	-	-	0,17	COMERCIAL	Importado desde China	\$41.650
3.7	1	Motor 85BYGH450C-060	86	86	151	151	-	-	5	COMERCIAL	Par de Retención 12KN. Disponible gratuitamente	\$0
3.8	1	Acoplamiento L75	-	41,3	50	50	-	-	0,454	COMERCIAL	ACOPLAMIENTOS LOVEJOY TIPO L-075 NBR	\$14.671
3.9	1	Tornillo de Potencia 1605	-	-	16	1000	1000	-	1,6	COMERCIAL	Importado desde China	\$33.200
3.10	2	Rodamientos UCP-201	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL		\$3.200
3.11	1	Nuez HIWIN1605	-	-	48	42	42	-	-	COMERCIAL	Importado desde China	\$0
3.12	1	Rail HIWIN HWG15-700	15	15	700	700	-	1,45	1,0115	COMERCIAL	Comprado en Chile	
3.13	4	Perno CAB HEX GR5 M6,5X25(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.14	8	Golilla M6,5(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.15	4	Perno CAB HEX GR5 M13X40 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.16	8	Golilla M13 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.17	4	Tuerca CAB HEX GR5 M13 (Fijación Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.18	8	Perno CAB HEX GR5 M4X25 (Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.19	8	Golilla M4 (Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.20	12	Perno CAB PARKER GR5 M4X35(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.21	12	Golilla M4 (Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.22	12	Tuerca GR5 M4(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.23	4	Perno CAB HEX GR5 M10X25 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.24	4	Golilla M10 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.25	6	Tronillo Cruz GR5 M5X20 (Fijación Nuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA	
3.26	1	Cadena Porta Cables	-	-	-	-	600	-	-	COMERCIAL		
4	1											98871
4.1	4	Buje Separador Porta Nuez	-	22	33	35	0,00038013	1460	0,019424782	TECHNVL		

4.2	2	Larguero Puente	40	40	1052	1055	-	2,41	2,54255	A36			
4.3	1	Lateral Derecho	200	5	1120	1130	0,226	39,3	8,8818	A36			
4.4	1	Lateral Izquierdo	200	5	1120	1130	0,226	39,3	8,8818	A36			
4.5	4	Pestaña de refuerzo	40	20	720	722	-	1,45	1,0469	A36			
4.6	1	Placa de Centro	100	5	240	242	0,0242	39,3	0,95106	A36			
4.7	1	Porta Cadena	40	5	982	983	0,03932	39,3	1,545276	A36			
4.8	1	Porta Rodamiento Derecho	100	5	240	242	0,0242	39,3	0,95106	A36			
4.9	1	Porta Rodamiento Izquierdo	100	5	240	242	0,0242	39,3	0,95106	A36			
4.10	1	Travesaño Impulsor	162	5	1062	1064	0,172368	39,3	0,172368	A36			
4.11	1	Viga maestra	40	2	1052	1052	0,04208	2,41	0,1014128	A36			
4.12	1	Motor 85BYGH450C-060	86	86	151	151	-	-	5	COMERCIAL	Par de Retención 12kN. Disponible gratuitamente	\$0	
4.13	1	Acoplamiento L75	-	41,3	50	50	-	-	0,454	COMERCIAL	ACOPLAMIENTOS LOVEJOY TIPO L-075 NBR	\$14.671	
4.14	2	Rail HIWIN HGW15-800	15	15	800	800	-	1,45	1,16	COMERCIAL	Comprado en Chile		
4.15	2	Rodamientos UCP-201	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL		\$3.200	
4.16	1	Nuez HIWIN1605	-	48	42	42	-	-	-	COMERCIAL	Importado desde China	\$0	
4.17	1	Porta Nuez	52	72	61	63	0,004536	7860	1,85395392	SAE1020			
4.18	4	Bloques HIWIN HGW20CC	30	63	77,5	77,5	-	-	9,52	COMERCIAL	Importado desde China	\$47.800	
4.19	1	Tornillo de Potencia 1605	-	16	1000	1000	-	-	1,6	COMERCIAL	Importado desde China	\$33.200	
4.20	4	Perno CAB HEX GRS M6,5X25(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.21	8	Golilla M6,5(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.22	4	Tuerca CAB HEX GRS M6,5 (Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.23	26	Perno CAB PARKER GR5 M4X35(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.24	26	Golilla M4 (Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.25	26	Tuerca GRS M4(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.26	4	Perno CAB HEX GRS M13X40 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.27	8	Golilla M13 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.28	4	Tuerca CAB HEX GRS M13 (Fijación Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.29	16	Perno CAB HEX GRS M4X25(Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.30	16	Golilla M4 (Fijación Bloques)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.31	8	Perno CAB HEX GRS M15X65 (Fijación Largueros)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.32	16	Golillas M15(Fijación Largueros)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.33	8	Tuerca GRS M15(Fijación Largueros)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.34	1	Cadena Porta Cables	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL			
4.35	4	Perno CAB HEX GRS M10X25 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.36	12	Golilla M10 (Fijación Portanuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
4.37	6	Tronillo Cruz GRS M5X20 (Fijación Nuez)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5	1	Base											
5.1	1	Cara frontal	180	5	1052	1055	0,1899	39,3	7,46307	A36			
5.2	1	Cara Posterior	180	5	1052	1055	0,1899	39,3	7,46307	A36			
5.3	2	Cara Lateral	130	5	1090	1090	0,1417	39,3	5,56881	A36			
5.4	4	Larguero X	40	2	130	132	0,00528	2,41	0,0127248	A36			
5.5	4	Larguero Y	40	2	901	901	0,03604	2,41	0,0868564	A36			
5.6	4	Larguero Z	40	2	50	50	0,002	2,41	0,00482	A36			
5.7	4	Oreja	40	5	45	46	0,00184	39,3	0,072312	A36			
5.8	1	Soporte Rodamiento	130	5	901	903	0,11739	39,3	4,613427	A36			
5.9	2	Soporte Z	40	2	130	132	-	2,41	0,31812	A36			
5.10	1	Tabla	940	11,1	1090	1092	1,02648	-	10	MADERA			
5.11	1	Travesaño	40	2	901	903	-	2,41	2,17623	A36			
5.12	1	Canaleta Portacadena	40	2	901	903	-	2,41	2,17623	A36			
5.13	1	Cadena Porta Cables	30	20	700	700	-	-	-	COMERCIAL			
5.14	4	Perno CAB HEX GRS M6,5X25(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.15	8	Golilla M6,5(Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.16	4	Tuerca CAB HEX GRS M6,5 (Fijación Motor)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.17	4	Perno CAB HEX GRS M12X40 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.18	16	Golilla M12 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.19	8	Tuerca CAB HEX GRS M12 (Fijación Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.20	2	Rodamientos UCF-201	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL		\$3.200	
5.21	1	Motor 85BYGH450C-060	86	86	151	151	-	-	5	COMERCIAL	Par de Retención 12kN. Disponible gratuitamente	\$0	
5.22	1	Acoplamiento L75	-	41,3	50	50	-	-	0,454	COMERCIAL	ACOPLAMIENTOS LOVEJOY TIPO L-075 NBR	\$14.671	
5.23	2	Rail HIWIN HGW20-1000	20	20	1000	1000	-	2,21	2,21	COMERCIAL	Comprado en Chile		
5.24	1	Tornillo de Potencia 1605	-	16	1000	1000	-	-	1,6	COMERCIAL	Importado desde China	\$33.200	
5.25	34	Perno CAB PARKER GR5 M5X35(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.26	34	Golilla M5 (Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.27	34	Tuerca GRS M5(Fijación Rail)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.28	4	Perno CAB HEX GRS M10X60 (Fijación Soporte)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.29	8	Golilla M10 (Fijación Soporte)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.30	4	Tuerca CAB HEX GRS M10(Fijación Soporte)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.31	40	Perno CAB HEX GRS M10X60 (Fijación Caras)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.32	80	Golilla M10 (Fijación Cara)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.33	40	Tuerca CAB HEX GRS M10 (Fijación Cara)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		
5.34	4	Perno CAB HEX GRS M12X70 (Fijación Soporte Rodamiento)	-	-	-	-	-	-	-	COMERCIAL	PERNERÍA		

ANEXO B

Planos de Fabricación



Nº	Designación	Cantidad	Referencia
0-5	Extrusor	1	5-A
0-4	Porta Extrusor	1	4-A
0-3	Mesa Horizontal	1	3-A
0-2	Puente	1	2-A
0-1	Base	1	1-A

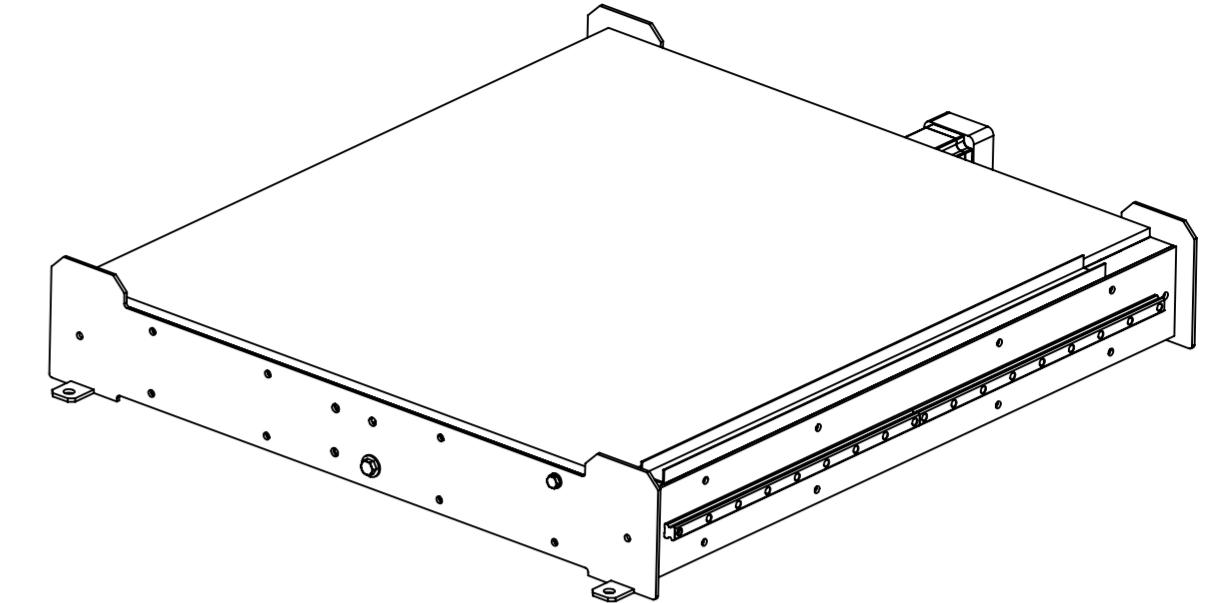
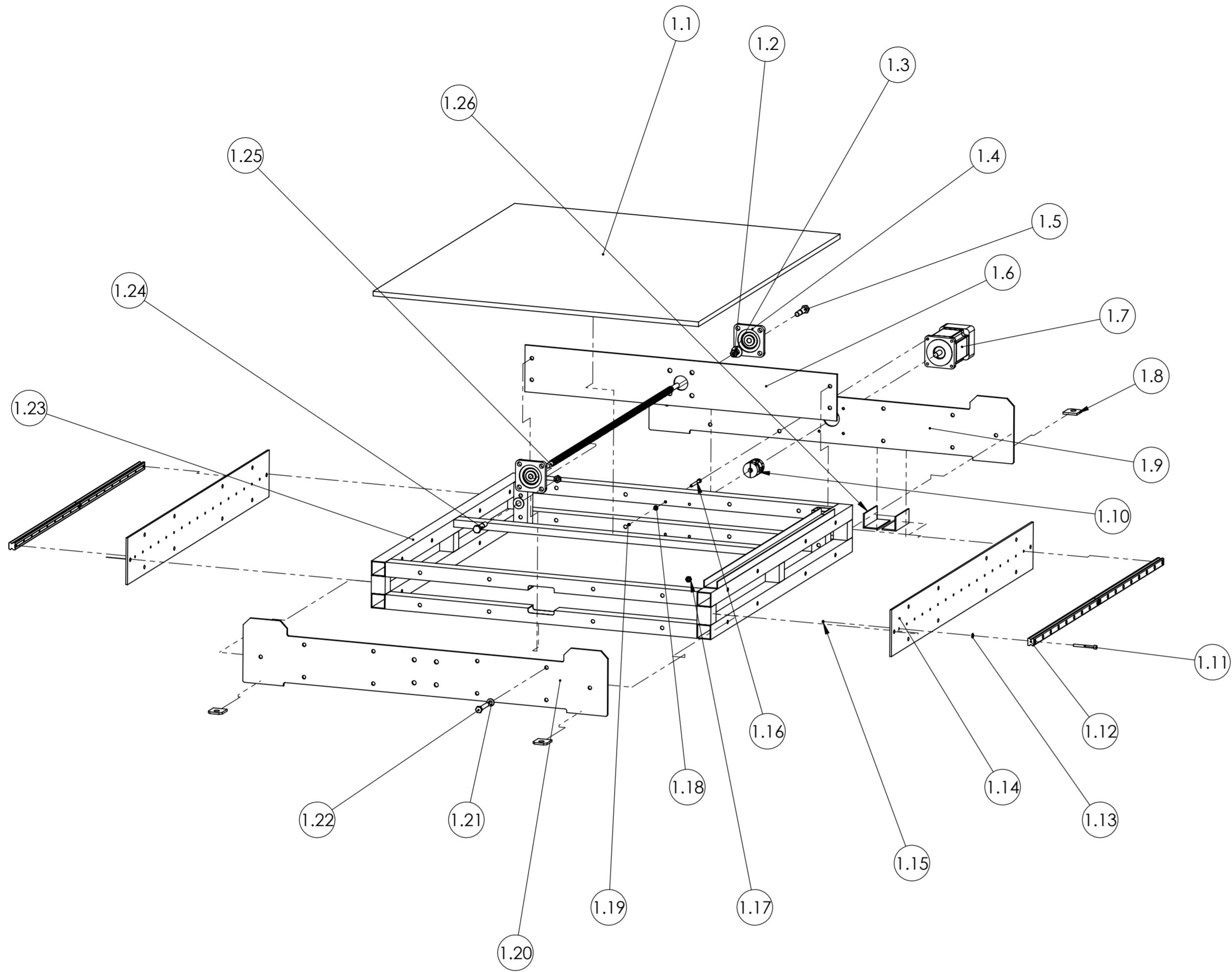
LISTA DE SUBSISTEMAS

Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile	PLANO:	PLANO: N.º DE DIBUJO: ESCALA:1:10 HOJA 1 DE 1
DIBUJ. CS VERIF. JL APROB. JL FABR. CALID.	NOMBRE FIRMA FECHA REVISIÓN MATERIAL: PESO:	

PLANO GENERA LIMPRESORA
3D EXTRUSORA DE HORMIGÓN

0-A

A2



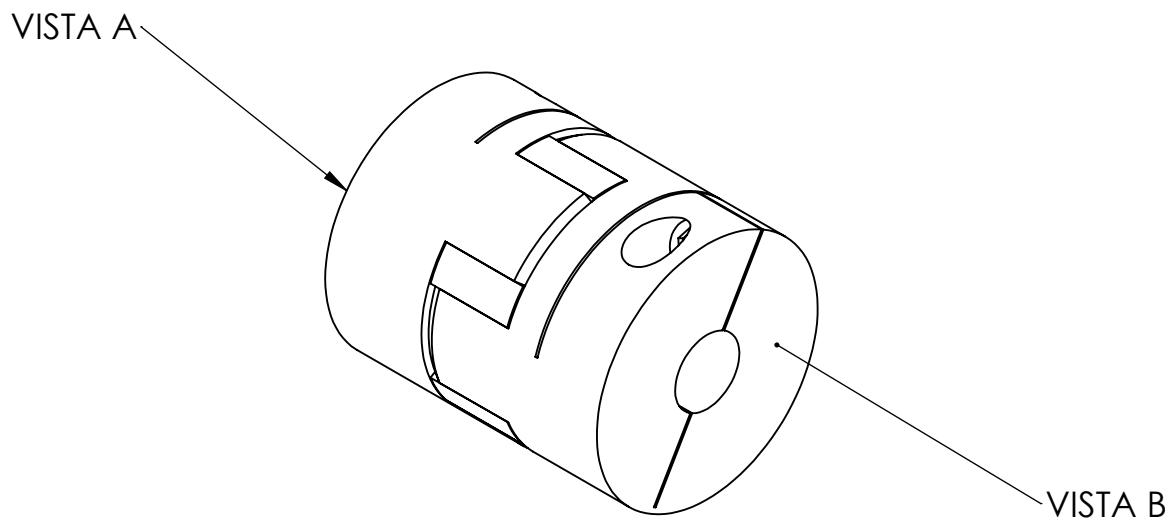
NOTA 1: Por simplicidad del explosionado, se omitieron gran parte de los pernos del conjunto "Base". Mostrando solo un ejemplar por cada ensamblaje (Perno, golillas y tuercas). Dentro de una misma pieza, el resto de las perforaciones contiene los mismos elementos de sujeción.

NOTA 2: El ensamblaje de la estructura del conjunto "Base" se encuentra detallada en los planos 1-C y 1-D.

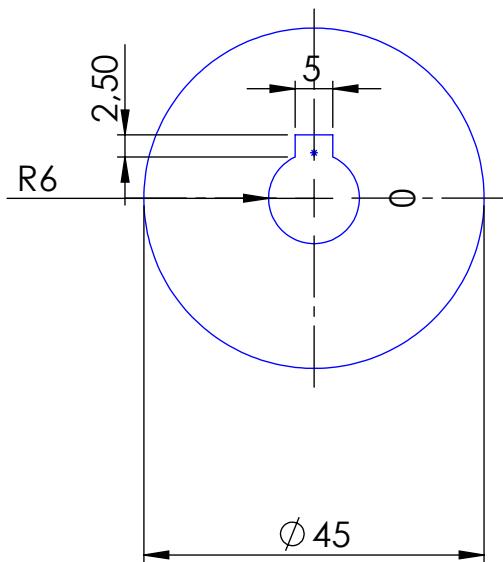
NOTA 3: El ensamblaje de las piezas "Oreja" en las caras frontal y posterior estan detallados en el Plano 1-E

Nº de Elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
1.1	Plataforma de Impresión	Madera Terciada 1090mmx940mmx1/2"	1
1.2	Tuerca M12	Tuerca Hex. T8 M12 P.1.75 ZINC	8
1.3	Golilla de presión M12	ZINC	8
1.4	Rodamiento de soporte Axial	F-203 estándar	2
1.5	Perno Hex M12X70	8.8 P. 1.75 ZINC	4
1.6	Porta Rodamiento		1
1.7	Motor movimiento en Y		1
1.8	Orejas de Fijación		4
1.9	Cara Posterior Acoplamiento	L-75	1
1.10	Perno Cil M5X35	P.0.8 Zinc	34
1.11	Riel 20X1000	HIWIN	2
1.12	Golilla de presión M5	Zinc	34
1.13	Cara Lateral		2
1.14	Tuerca Hex. M5	T8 P.0.8 Zinc	34
1.15	Tornillo Cruz M5		4
1.16	Tuerca Hex M10	T8 P.1.5 Zinc	36
1.17	Tuerca Hex M5		4
1.18	Golilla M5	Zinc	4
1.19	Cara Frontal		1
1.20	Golilla de presión M10	Zinc	72
1.21	Perno Hex M10x60	T8 P1.5 Zinc	36
1.22	Estructura de la Base	Ver Plano 1-B y 1-C	1
1.23	Perno Hex M12X40	8.8 P. 1.75 ZINC	4
1.24	Tornillo de Potencia		1
1.25	Escuadra portamotor		2
1.26			

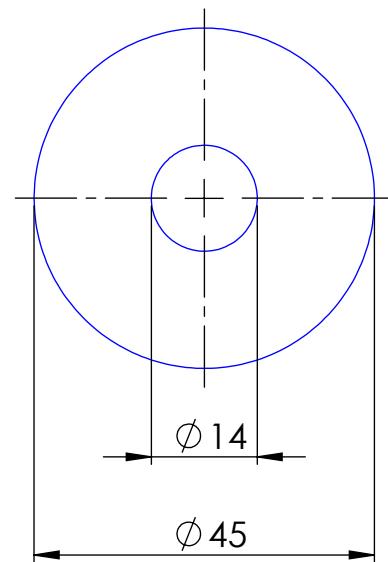
Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				PLANO:	TÍTULO:	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	REVISIÓN	Plano de piezas y explosionado subconjunto "Base"	
VERIF.	JL					
APROB.	JL					
FABR.						
CALID.					PESO:	
					ESCALA:1:10	
						HOJA 1 DE 1
				N.º DE DIBUJO	1-B	A2



VISTA A



VISTA B



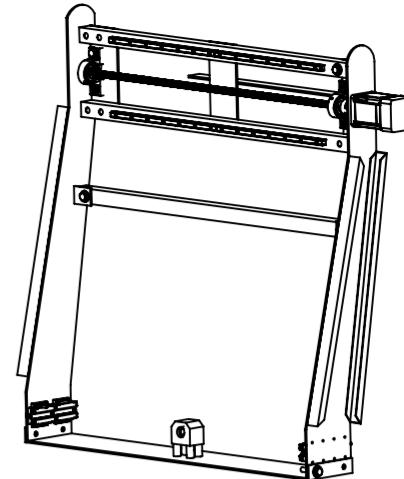
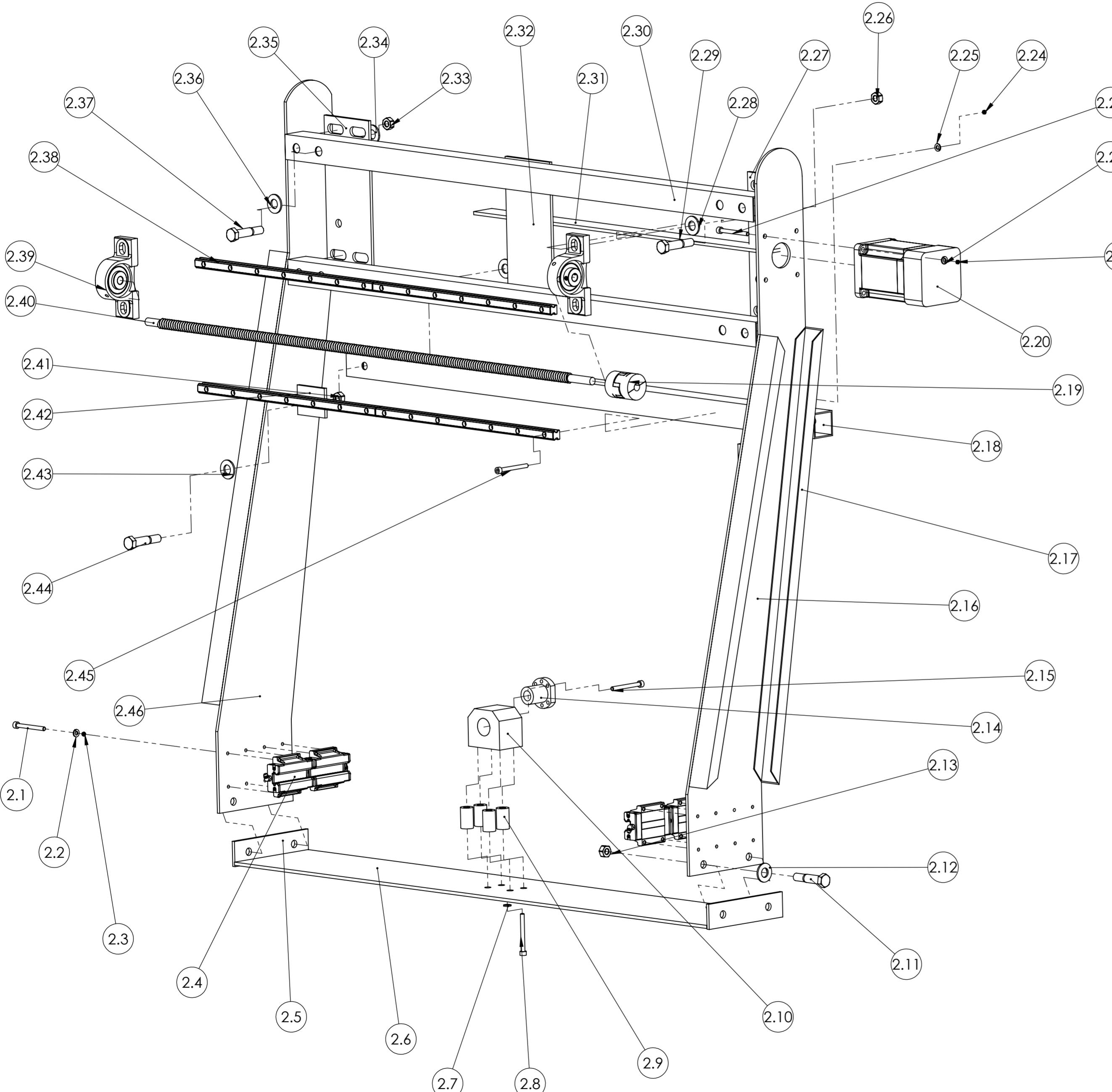
Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

TÍTULO:
Perforaciones para el acoplamiento
subsistema "Base"

NOMBRE	FIRMA	FECHA	PLANO:	REVISION	SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS	N.º DE DIBUJO	1-G	A4
DIBUJ.	CS							
VERIF.	JL							
APROB.	JL							
FABR.								
CALID.			PESO:			ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1

NOTA 1: Por simplicidad del explosionado, se omitieron gran parte de los pernos del conjunto "Puente", mostrando solo un ejemplar por cada ensamblaje (Perno, golillas y tuercas). Dentro de una misma pieza, el resto de las perforaciones contiene los mismos elementos de sujeción.

NOTA 2: El ensamblaje de las piezas "Pestaña de Refuerzo" en las placas laterales estan detallados en el Plano 2-E al igual que las "Orejas de Sujeción".



Nº De elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
2.1	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	16
2.2	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	32
2.3	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	32
2.4	Bloque	HIWIN Modelo HGW-20CC	4
2.5	Pestaña unión	Placa 5mm A36	2
2.6	Placa Inferior	Placa 5mmA36	1
2.7	Golilla M10	ZINC	8
2.8	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
2.9	Buje de altura	Technyl	4
2.10	Portanuez	Acero SAE 1020	1
2.11	Perno HEX M12X6030	8.8 ZINC	4
2.12	Golilla M12	ZINC	8
2.13	Tuerca Hex M12	8.8 Zinc	4
2.14	Nuez	-	1
2.15	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6
2.16	Placa Lateral Izquierda	Placa 5mm A36	1
2.17	Pestaña de Refuerzo	Perfil C 2x20x40x720mmSAE1020	4
2.18	Viga Maestra	Perfil 2x40x40x1052mm SAE1020	1
2.19	Acoplamiento	L75	1
2.20	Motor de movimiento en X	-	1
2.21	Tuerca Hex M5	Zinc	4
2.22	Golilla Hex M5	Zinc	4
2.23	Tornillo Cruz M5	-	4
2.24	TUERCA HEX. T8 M5	Zinc	34
2.25	GOLILLA PL-PRE M5	Zinc	34
2.26	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
2.27	Placa porta rodamiento izq.	Placa 5mm a36	1
2.28	Golilla M10	ZINC	8
2.29	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
2.30	Travesaño Portariel	Perfil 2x40x40x1052mmSAE1020	2
2.31	Placa Portacables	Placa 5mm a36	1
2.32	Placa de centro	Placa 5mm a36	1
2.33	TUERCA HEX. °2 UNC 9/16"	Zinc	8
2.34	GOLILLA PL-PRES 9/16"	Zinc	16
2.35	Placa porta rodamiento der,	Placa 5mm a36	1
2.36	GOLILLA PL-PRES 9/16"	Zinc	16
2.37	PERNO HEX 9/16 X 2 1/2"	°2 UNC Zinc	8
2.38	Riel 15x1000	HIWIN	2
2.39	Rodamiento c/soporte	UCP201	2
2.40	Tornillo de Potencia	1000mm	1
2.41	Tuerca Hex M12	8.8 Zinc	2
2.42	Oreja se sujeción	Placa 5mm a36	2
2.43	Golilla M12	Zinc	4
2.44	Perno HEX M12X60	8.8 Zinc	2
2.45	PERNO COCINA M5 X 35	Zinc	34
2.46	Placa Lateral Derecha	Placa 5mm a36	1

Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemática
Universidad de Chile

6

TÍTULO:
Plano de piezas y explosionado
subconjunto "Puente"

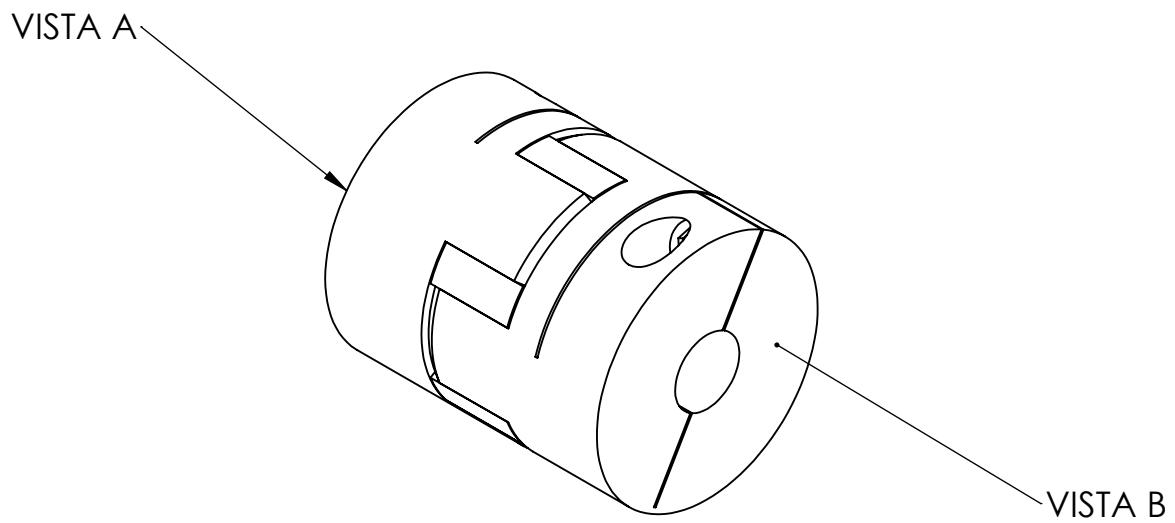
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	REVIS.
DIBUJ.	CS			
VERIF.	JL			MATE
APROB	JL			
FABR.				
CALID.				PESO

ION

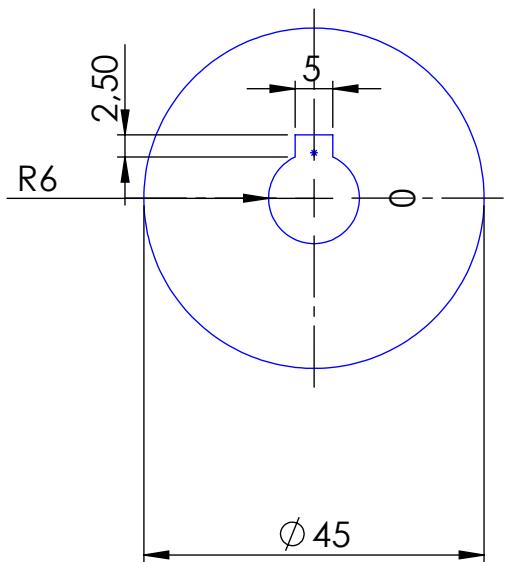
subconjunto "Puente"

2-B

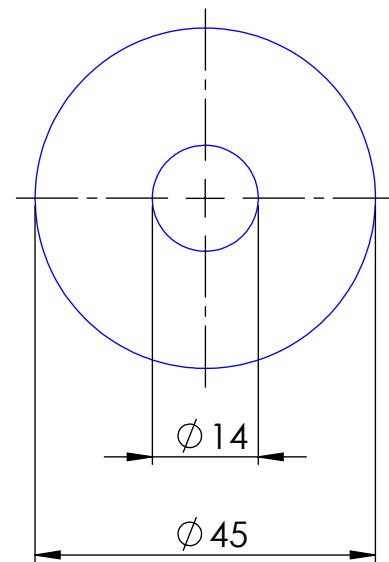
1



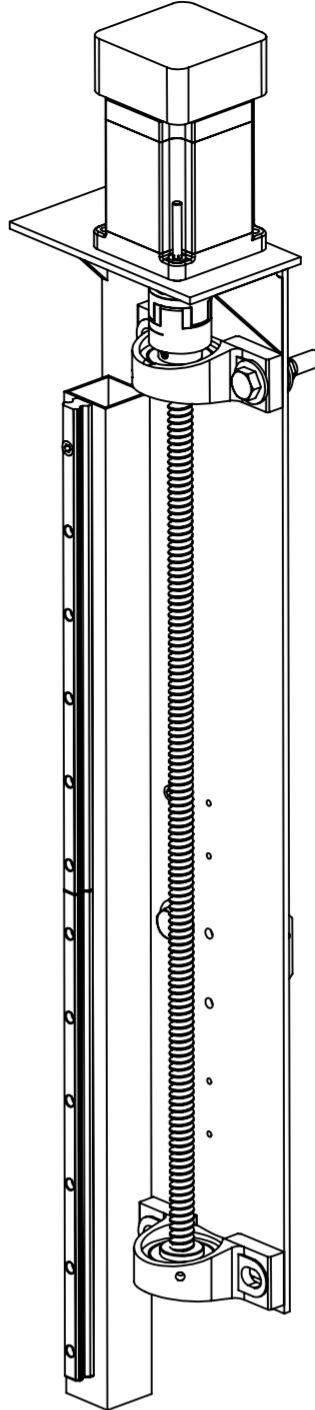
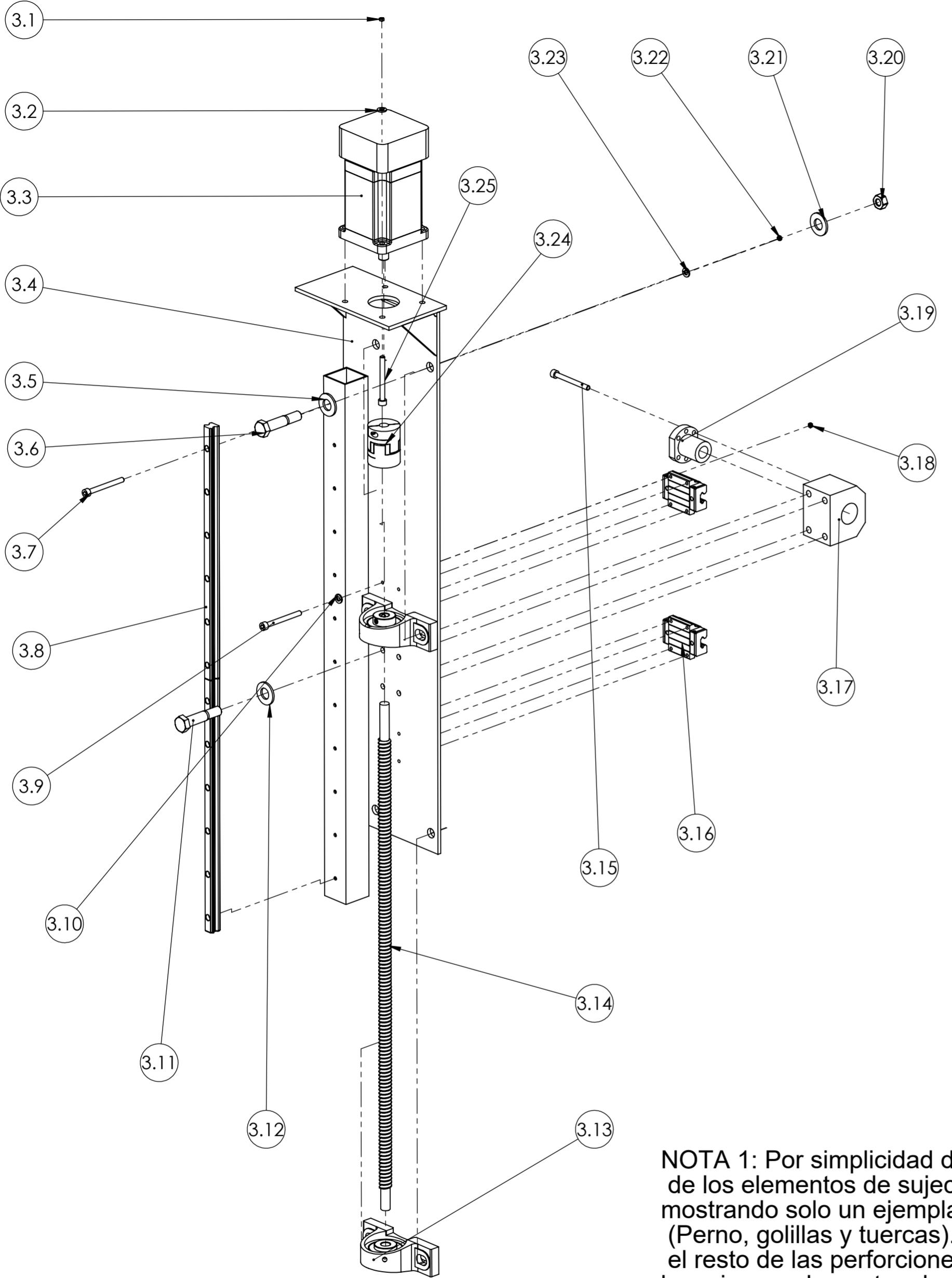
VISTA A



VISTA B



	Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				TÍTULO: Perforaciones para el acoplamiento subsistema "Puentel"
DIBUJ.	NOMBRE CS	FIRMA	FECHA	PLANO:	REVISIÓN
VERIF.	JL				
APROB.	JL			SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS	N.º DE DIBUJO
FABR.					
CALID.			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

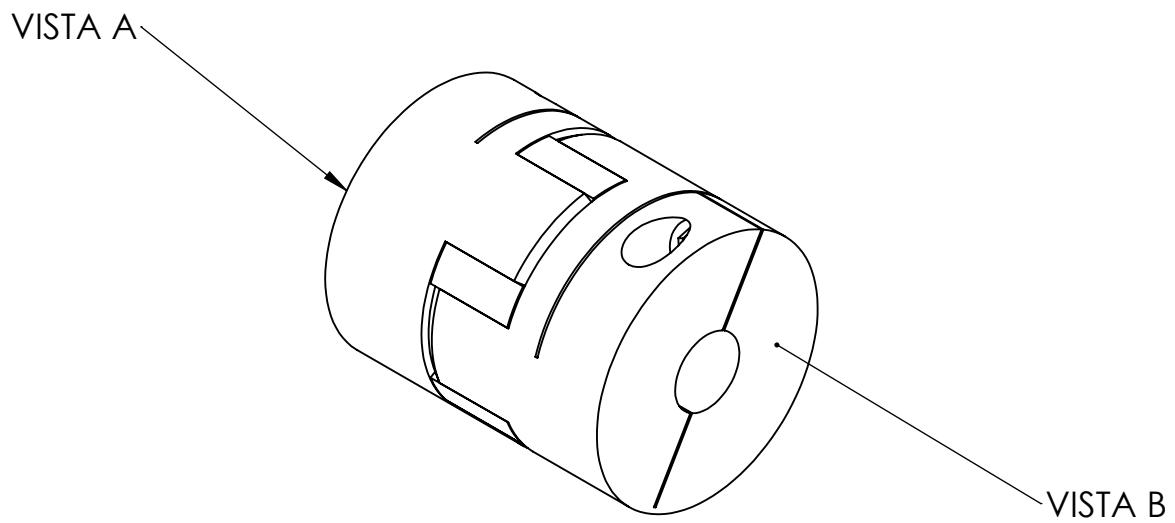


NOTA 1: Por simplicidad del explosionado, se omitieron gran parte de los elementos de sujeción del conjunto "Mesa Horizontal", mostrando solo un ejemplar por cada ensamblaje (Perno, golillas y tuercas). Dentro de una misma pieza, el resto de las perforaciones contiene los mismos elementos de sujeción.

NOTA 2: El ensamblaje de la estructura del subsistema "Mesa Horizontal" se encuentra detallada en los planos 3-D y 3-E.

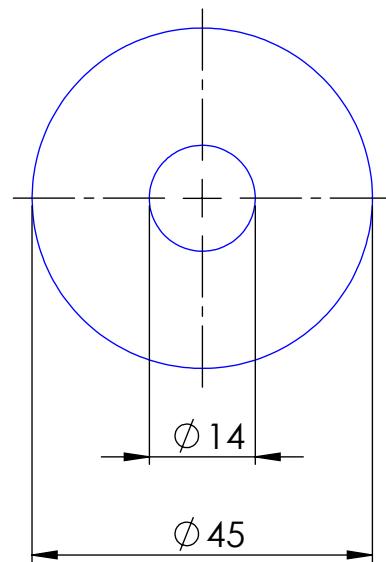
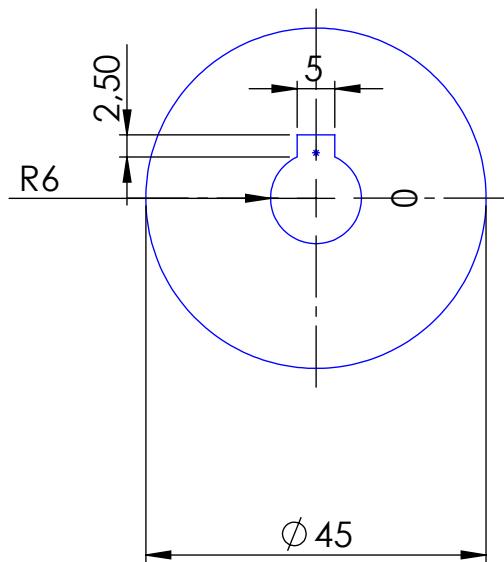
Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
3.1	Tuerca Hex M5	Zinc	4
3.2	Golilla Hex M5	Zinc	4
3.3	Motor de movimiento en Z	-	1
3.4	Estructura Principal	Ver planos 3-D y 3-E	1
3.5	Golilla M10	ZINC	8
3.6	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
3.7	PERNO COCINA M5 X 35	Zinc	34
3.8	Riel 15x1000	HIWIN	1
3.9	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	8
3.10	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	16
3.11	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
3.12	Golilla M10	ZINC	4
3.13	Rodamiento c/soporte	UCP201	2
3.14	Tornillo de Potencia	1000mm	1
3.15	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6
3.16	Bloque	HIWIN Modelo HGW-15CC	2
3.17	Portanuez	Acero SAE 1020	1
3.18	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	8
3.19	Nuez	-	1
3.20	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
3.21	Golilla M10	ZINC	8
3.22	TUERCA HEX. T8 M5	Zinc	34
3.23	GOLILLA PL-PRE M5	Zinc	34
3.24	Acoplamiento	L75	1
3.25	Tornillo Cruz M5	-	4

Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				PLANO:	TÍTULO: Plano de piezas y explosionado subconjunto "Mesa Horizontal"	
DIBUJ.	NOMBRE CS	FIRMA JL	FECHA	REVISIÓN		
VERIF.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO
APROB.						
FABR.						PESO:
CALID.						ESCALA:1:5
						HOJA 1 DE 1
						A2



VISTA A

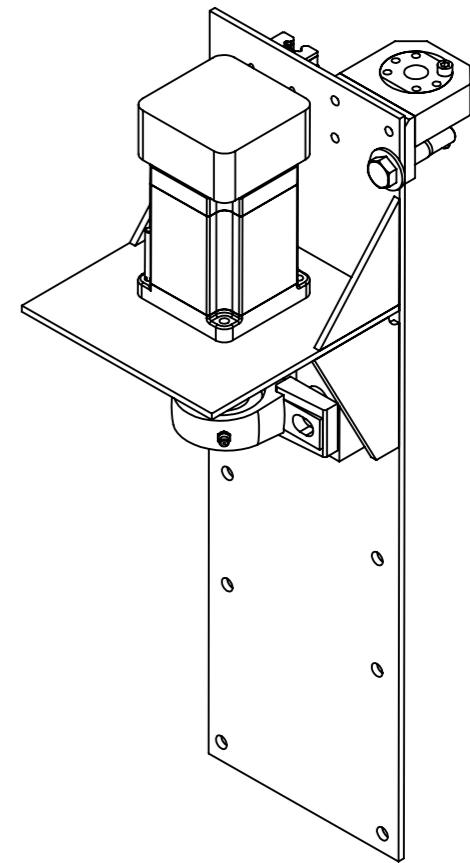
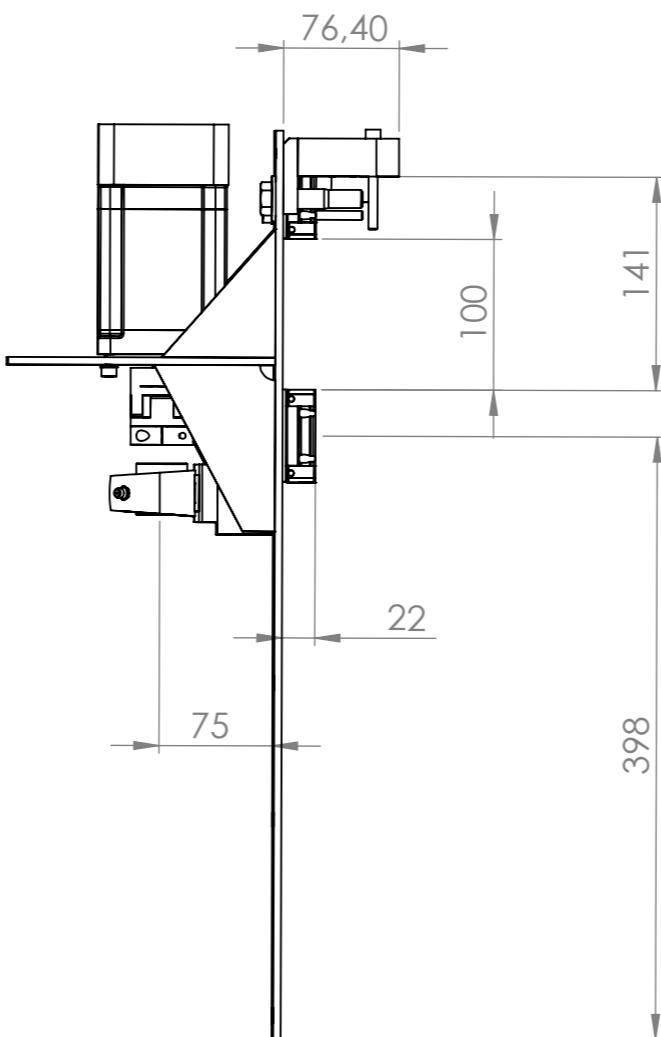
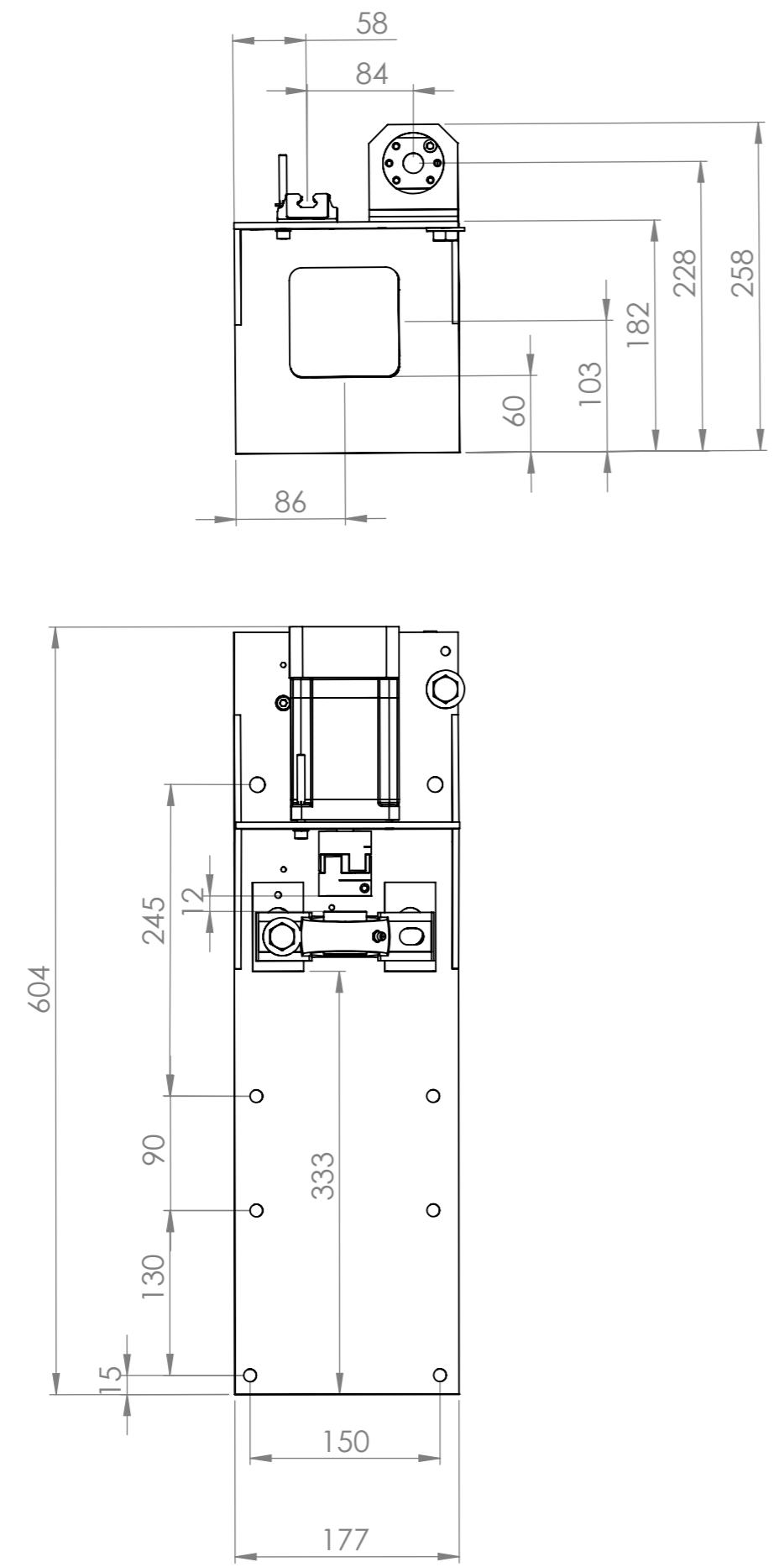
VISTA B



Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

TÍTULO:
Perforaciones para el acoplamiento
subsistema "Mesa Horizontal"

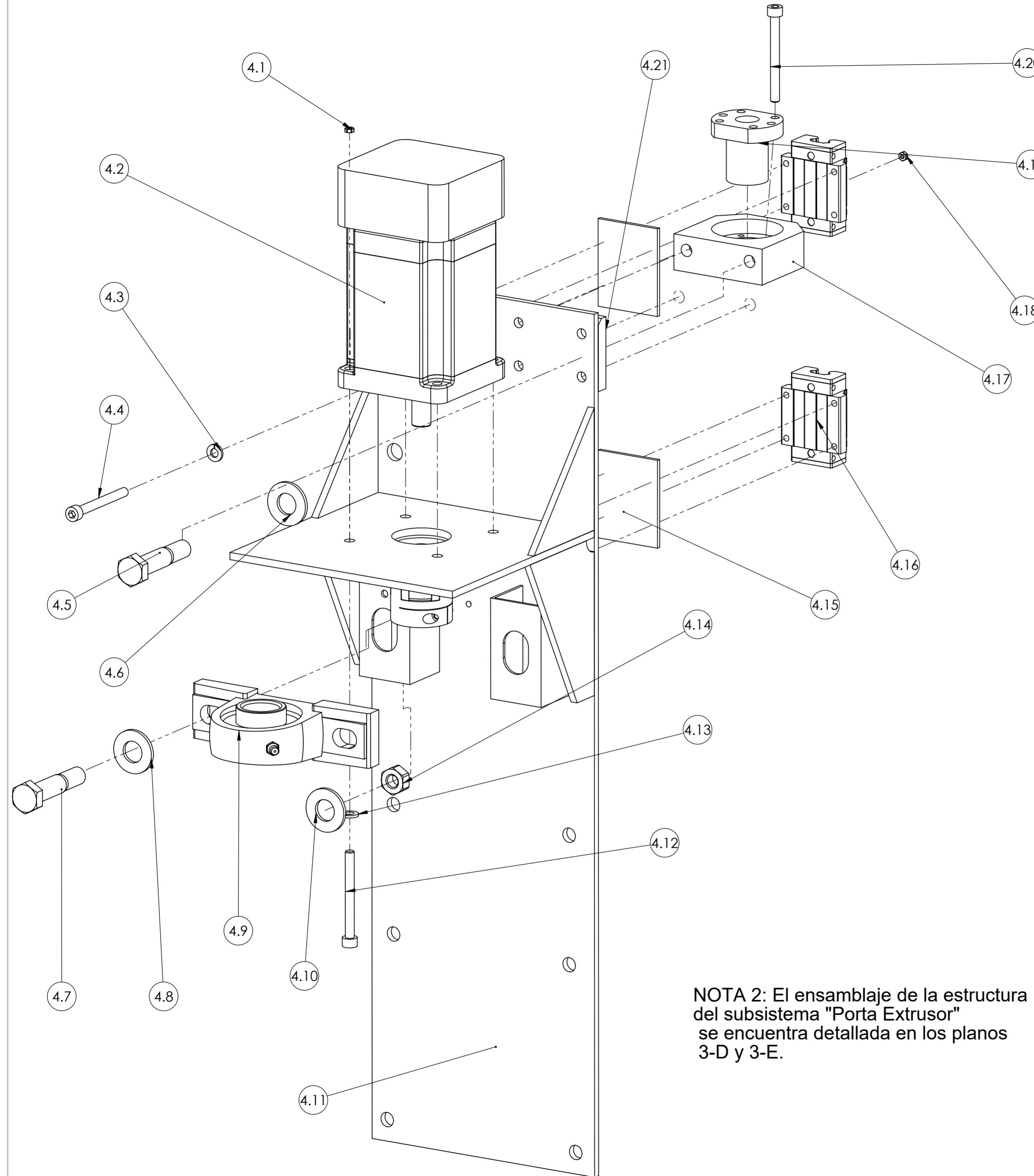
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PLANO:	REVISION		
DIBUJ.	CS						
VERIF.	JL						
APROB.	JL						
FABR.				SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS		N.º DE DIBUJO	
CALID.				PESO:		3-F	A4
					ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1



Escala:1:5

Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				PLANO:	TÍTULO:
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	CS				
VERIF.	JL				
APROB.	JL				
FABR.					
CALID.					
				SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS	
				PESO:	
				ESCALA:1:5	
				HOJA 1 DE 1	

Plano general
subconjunto "Porta Extrusor"
4-A A3

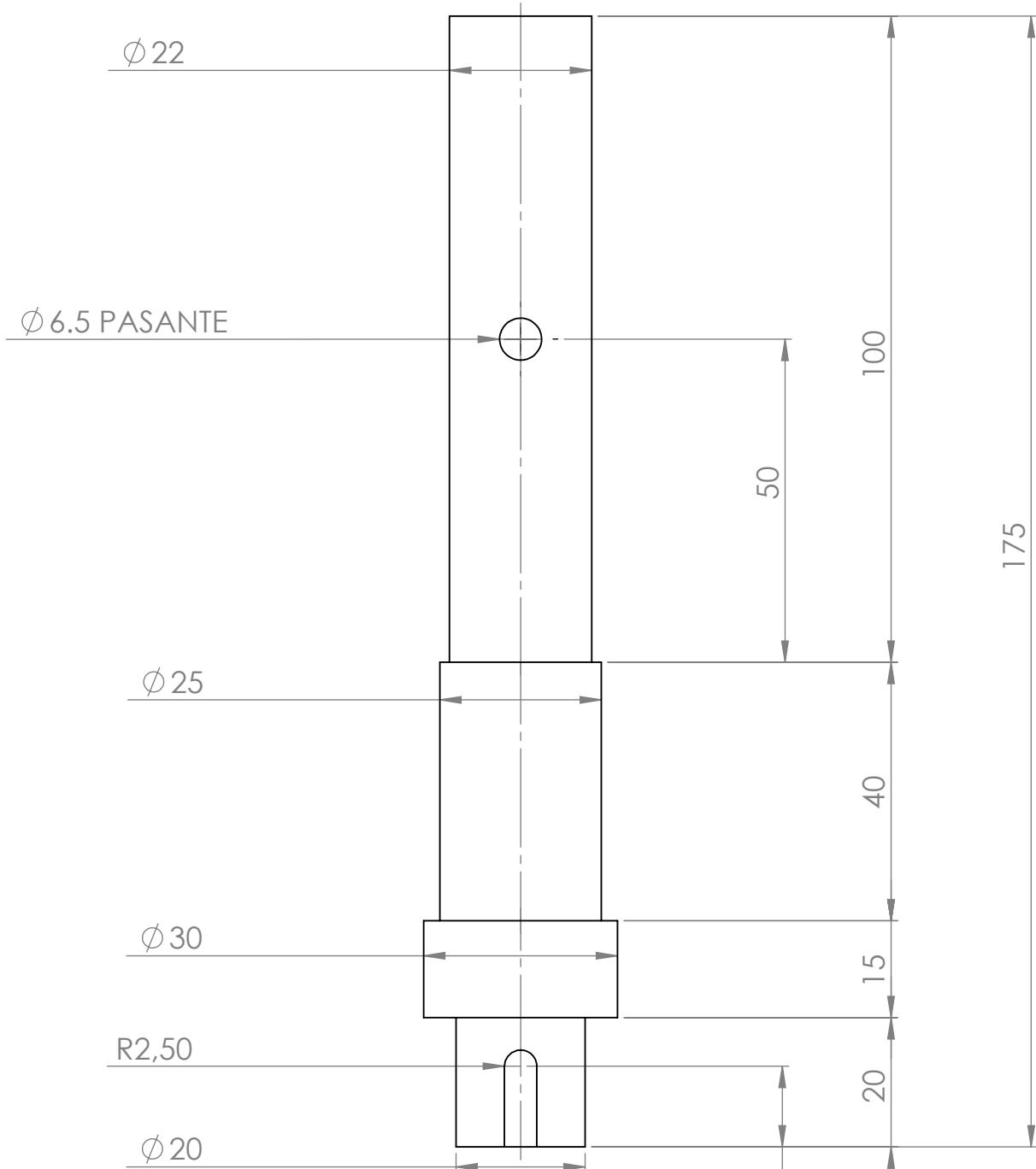


NOTA 2: El ensamblaje de la estructura del subsistema "Porta Extrusor" se encuentra detallada en los planos 3-D y 3-E.

NOTA 1: Por simplicidad del explosionado, se omitieron gran parte de los elementos de sujeción del conjunto "Porta Extrusor", mostrando solo un ejemplar por cada ensamblaje (Perno, golillas y tuercas). Dentro de una misma pieza, el resto de las perforaciones contiene los mismos elementos de sujeción.

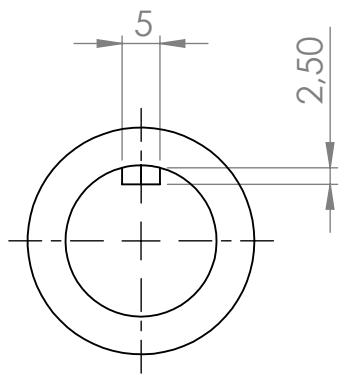
Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
4.1	Tuerca Hex M5	Zinc	4
4.2	Motor de extrusion	-	1
4.3	GOLILLA PL-PRES M4	Zinc	16
4.4	PERNO COCINA M4 X 25	Zinc	8
4.5	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
4.6	Golilla M10	ZINC	4
4.7	Perno HEX M10X60	8.8 ZINC	4
4.8	Golilla M10	ZINC	4
4.9	Rodamiento c/sostiene	UCP201	2
4.10	Golilla M10	ZINC	8
4.11	Estructura principal	Ver planos 4-D y 4-E	1
4.12	Tornillo Cruz M5	-	4
4.13	Golilla Hex M5	Zinc	4
4.14	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	4
4.15	Placa niveladora	Acero A36 5mm	2
4.16	Bloque	HIWIN Modelo HGW-15CC	2
4.17	Portanuez	Acero SAE 1020	1
4.18	TUERCA HEX. T8 M4	Zinc	8
4.19	Nuez	-	1
4.20	PERNO COCINA M5 X 20	Zinc	6
4.21	Placa de altura	Acero SAE1020	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS MEDIDAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.			MATERIAL:	
			PESO:	ESCALA:1:20
				HOJA 1 DE 1
TÍTULO: Plano de piezas y explosionado subconjunto "Porta Extrusor"				
N.º DE DIBUJO 4-B A2				



Escala 1:1

Material: Acero SAE1020



Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

TÍTULO:

Eje de acoplamiento,
subconjunto "Porta Extrusor"

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PLANO:	REVISIÓN
DIBUJ.	CS				
VERIF.	JL				
APROB.	JL				
FABR.					
CALID.					

SI NO SE ESPECIFICA LO
CONTRARIO, TODAS
LAS COTAS ESTAN EN
MILÍMETROS

N.º DE DIBUJO

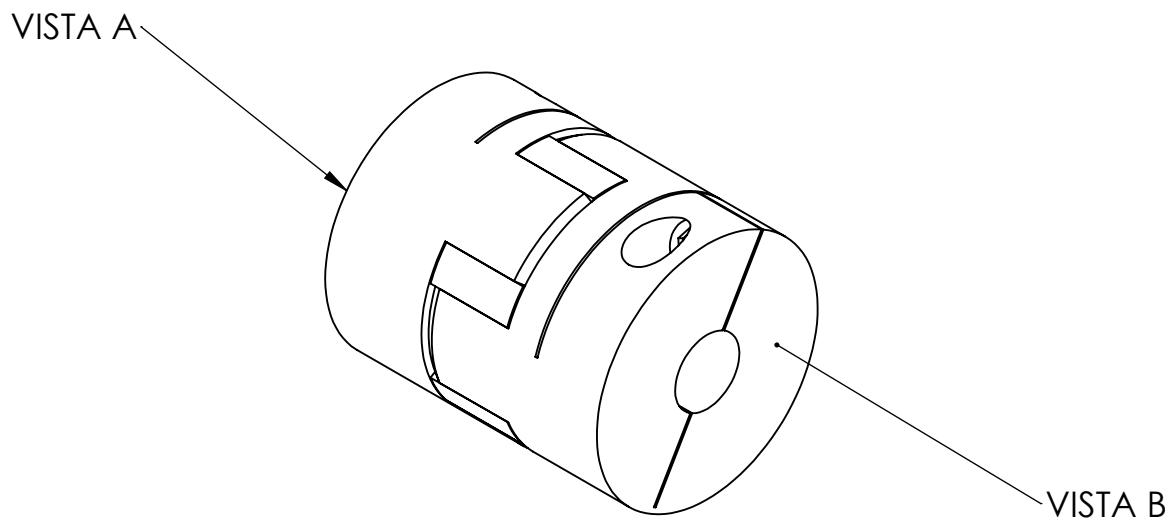
4-F

A4

PESO:

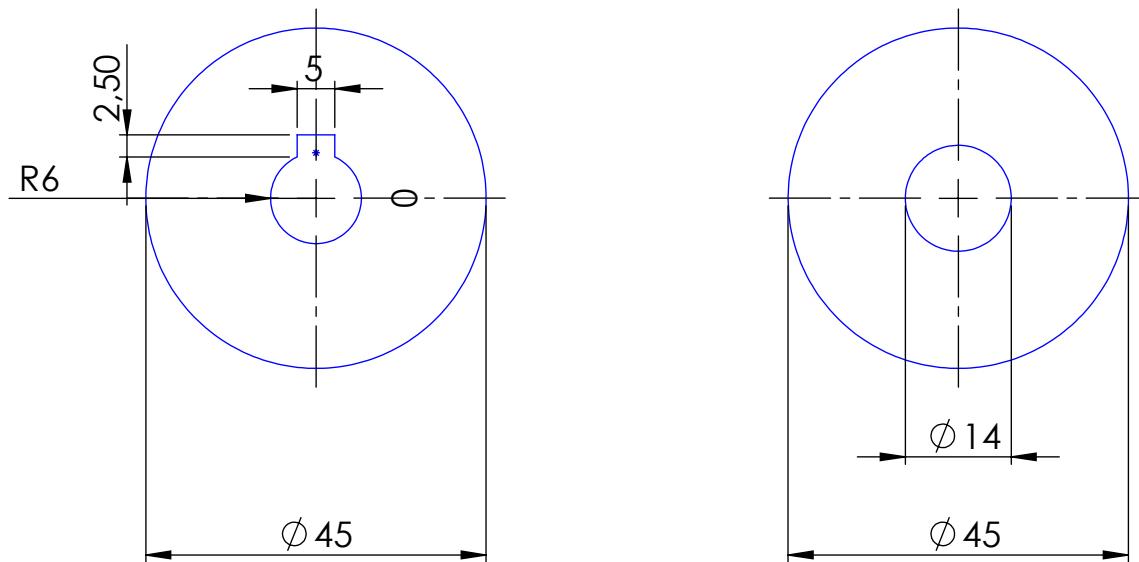
ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

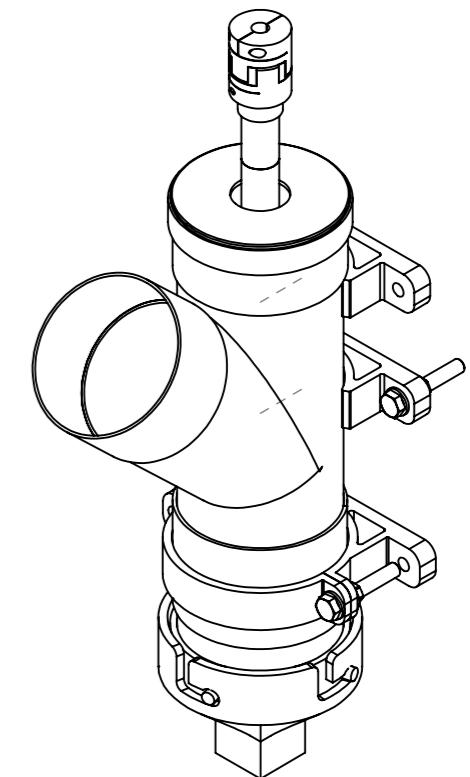
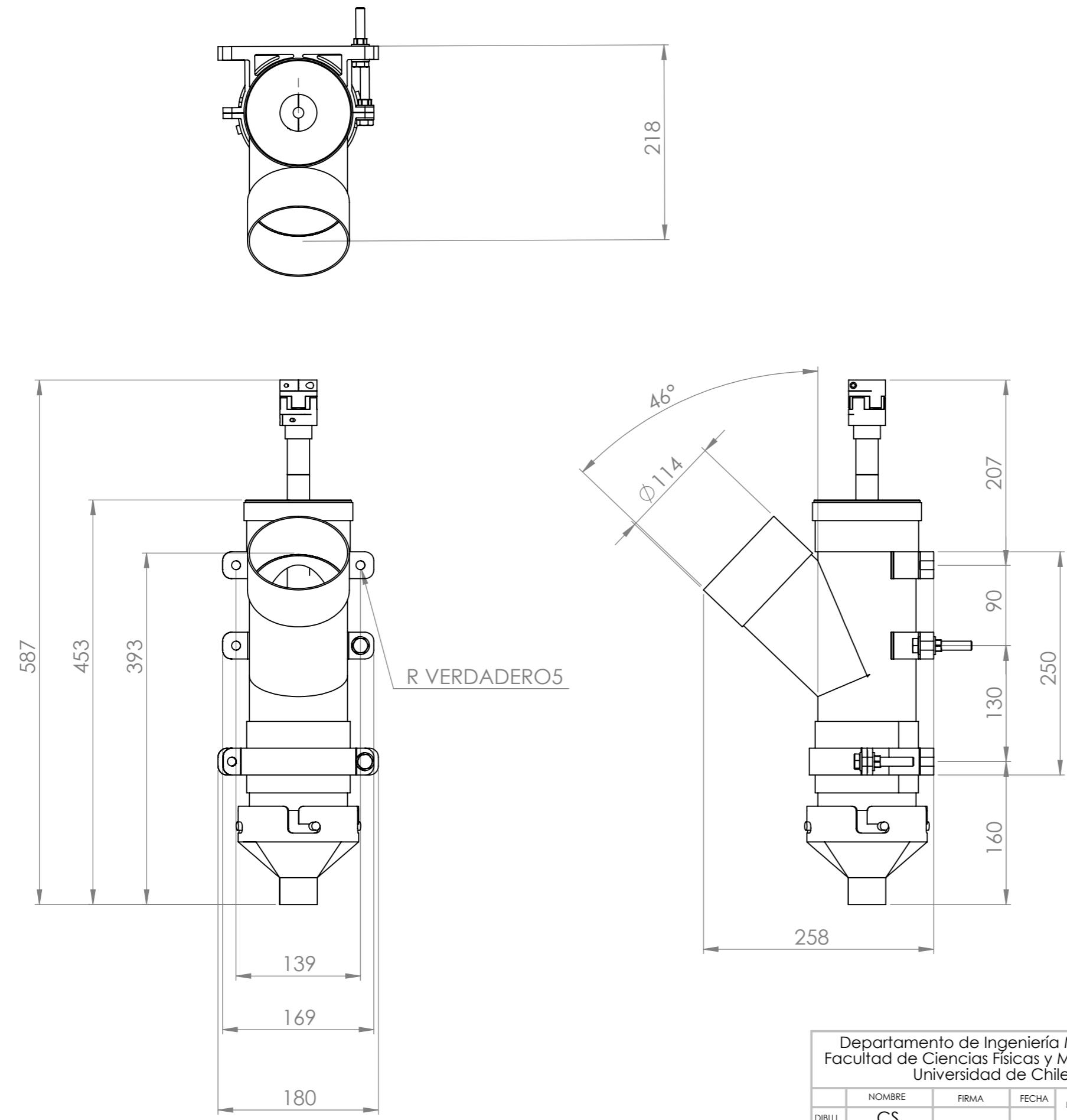


VISTA A

VISTA B



	Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				TÍTULO: Perforaciones para el acoplamiento subsistema "Porta Extrusor"
DIBUJ.	NOMBRE CS	FIRMA	FECHA	PLANO:	REVISIÓN
VERIF.	JL				
APROB.	JL			SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS	N.º DE DIBUJO
FABR.					
CALID.			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



Escala 1:5

Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

PLANO:

TÍTULO:

Plano general
subconjunto "Extrusor"

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	CS				
VERIF.	JL				
APROB.	JL				
FABR.					
CALID.					

SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS

N.º DE DIBUJO

5-A

A3

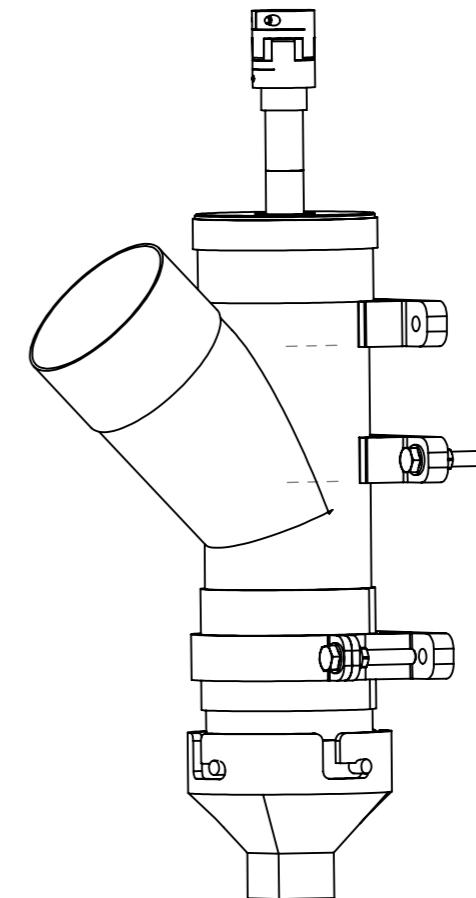
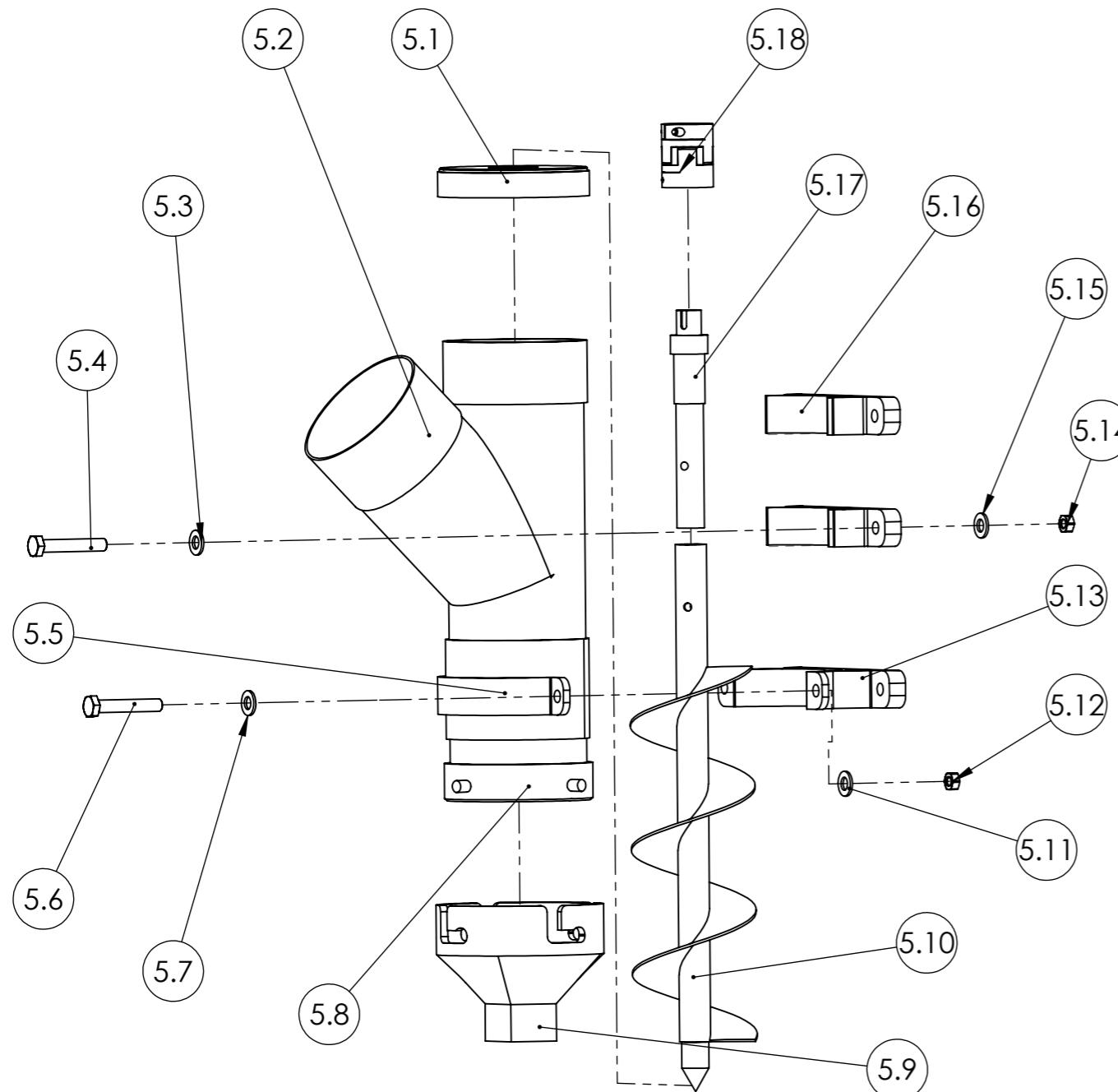
ESCALA: 1:5

HOJA 1 DE 1

NOTA 1: Por simplicidad del explosionado, se omitieron gran parte de los elementos de sujeción del conjunto "Extrusor", mostrando solo un ejemplar por cada ensamblaje (Perno, golillas y tuercas). Dentro de una misma pieza, el resto de las perforaciones contiene los mismos elementos de sujeción.

NOTA 2: Los detalles de corte de los tubos de PVC se encuentran en el plano 5-C

NOTA 3: Los detalles de las impresiones 3D se encuentran en el plano 5-D



Nº de elemento	Nombre de la pieza	Descripción	Cantidad
5.1	Tapa	PVC Ø110	1
5.2	Carcasa	Ensambles de PVC	1
5.3	Golilla M10	ZINC	6
5.4	PERNO HEX. 8.8 M10 X 30	ZINC	6
5.5	Cintillo delantero	PLA	1
5.6	PERNO HEX. 8.8 M10 X 25	ZINC	2
5.7	Golilla M10	ZINC	2
5.8	Porta boquilla	PLA	1
5.9	Boquilla	PLA	1
5.10	Barreno	Elem. comercial modificado	1
5.11	Golilla M10	ZINC	2
5.12	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	2
5.13	Soporte inferior	PLA	1
5.14	Tuerca HEX M10	8.8 ZINC	6
5.15	Golilla M10	ZINC	6
5.16	Soporte superior	PLA	2
5.17	Eje de acople	SAE1020	1
5.18	Acoplamiento	L-75	1

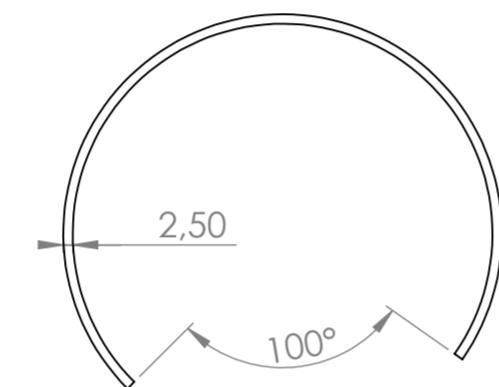
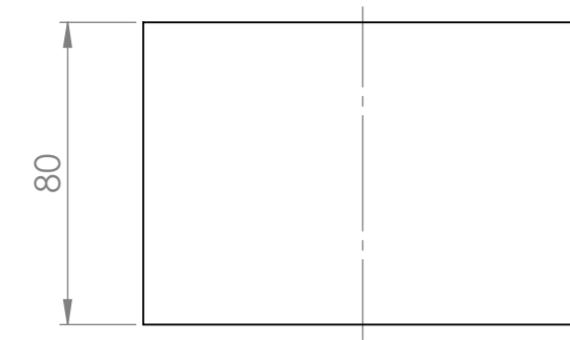
Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				PLANO:	TÍTULO:
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
VERIF.	CS				
APROB.	JL			MATERIAL:	
FABR.					N.º DE DIBUJO
CALID.				PESO:	ESCALA: 1:5
					HOJA 1 DE 1

Plano de piezas y explosionado
subconjunto "Extrusor"

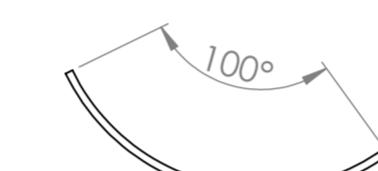
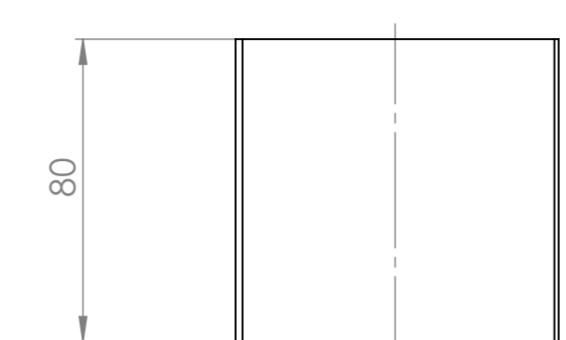
5-B A3

NOTA: TODAS LAS PARTES FUERON FABRICADAS A PARTIR DE TUBERÍA PVC SANITARIA, DÍAMETRO NOMINAL 110MM.

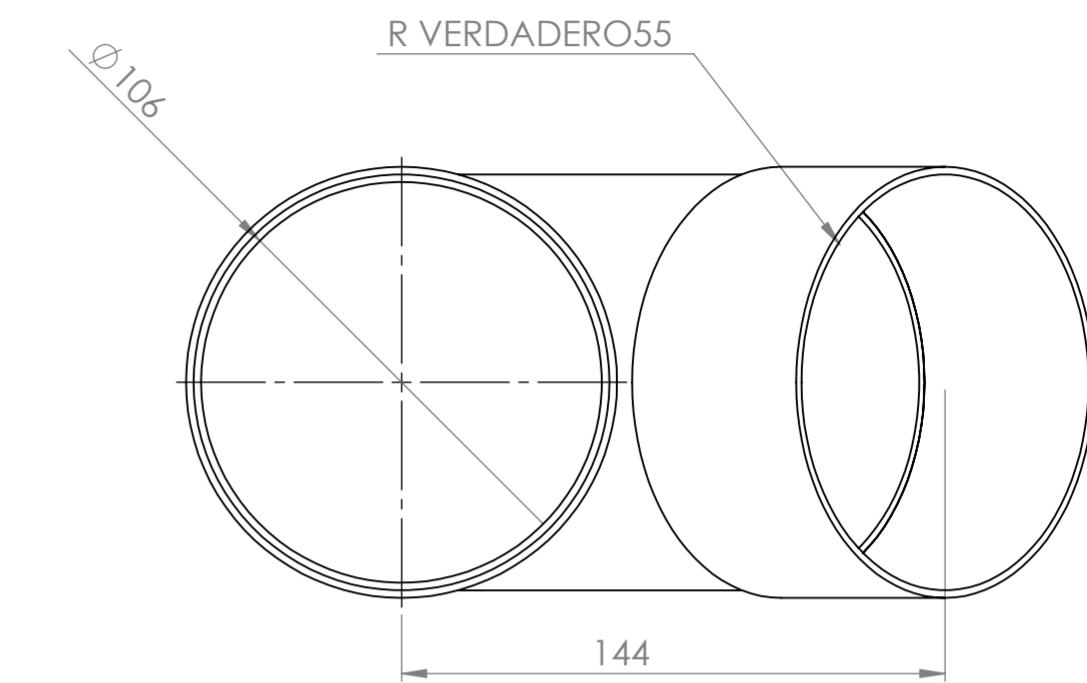
CINTILLO MAYOR



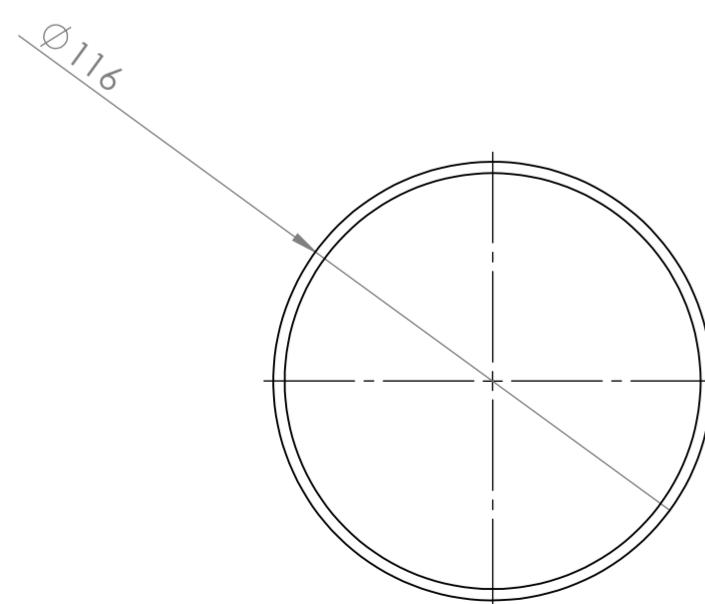
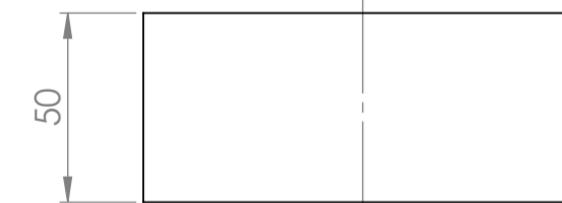
CINTILLO MENOR



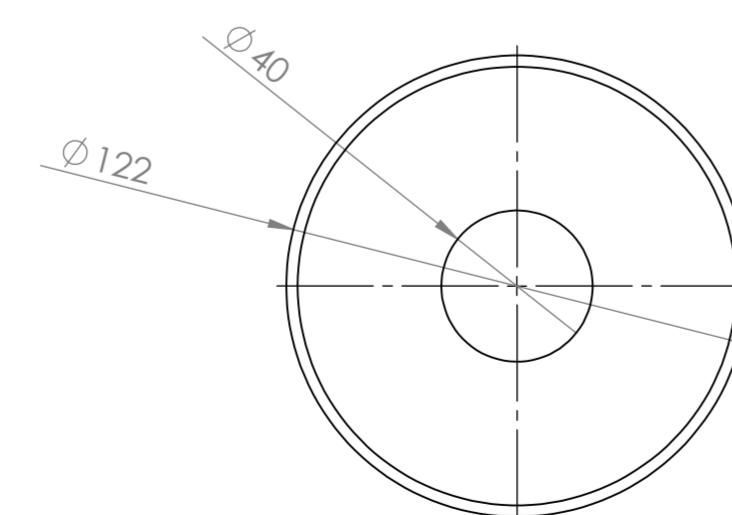
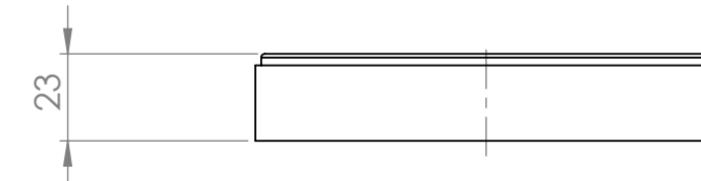
YEE PVC SANITARIO ADAPTADO



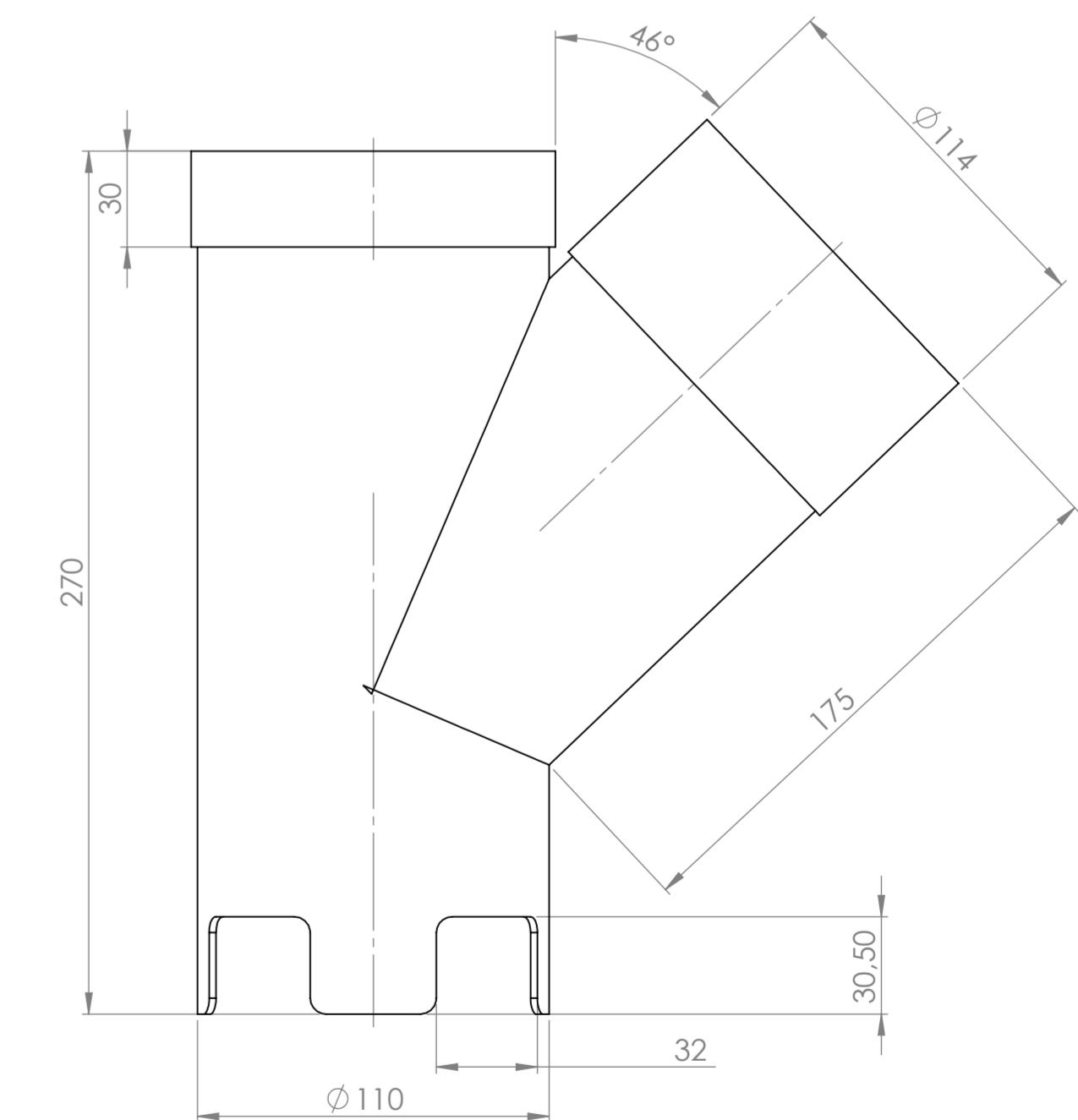
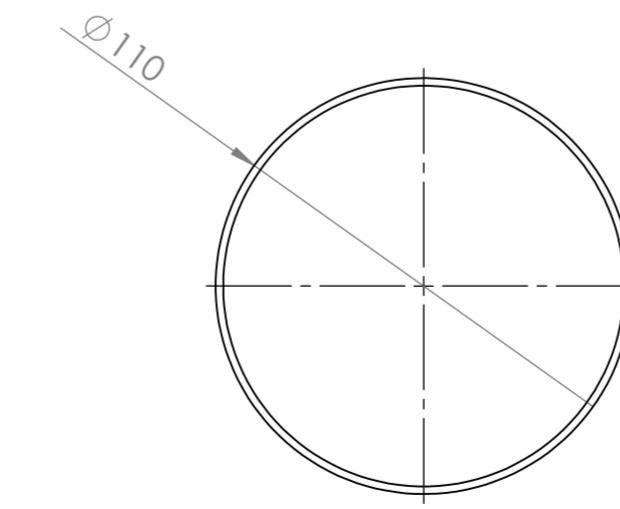
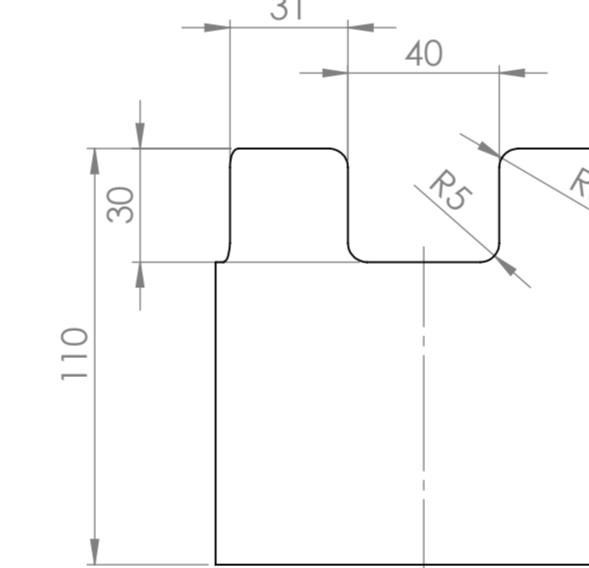
TUBO CORTO



TAPA



TUBO LARGO HEMBRA

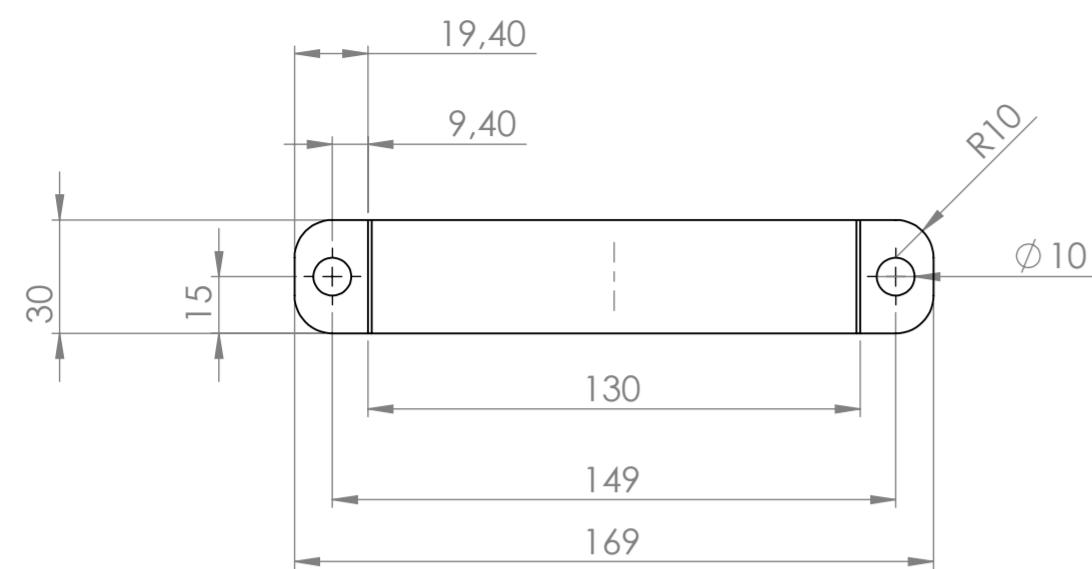


Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile	PLANO:
NOMBRE	FIRMA
DIBUJ.	CS
VERIF.	JL
APROB.	JL
FABR.	
CALID.	

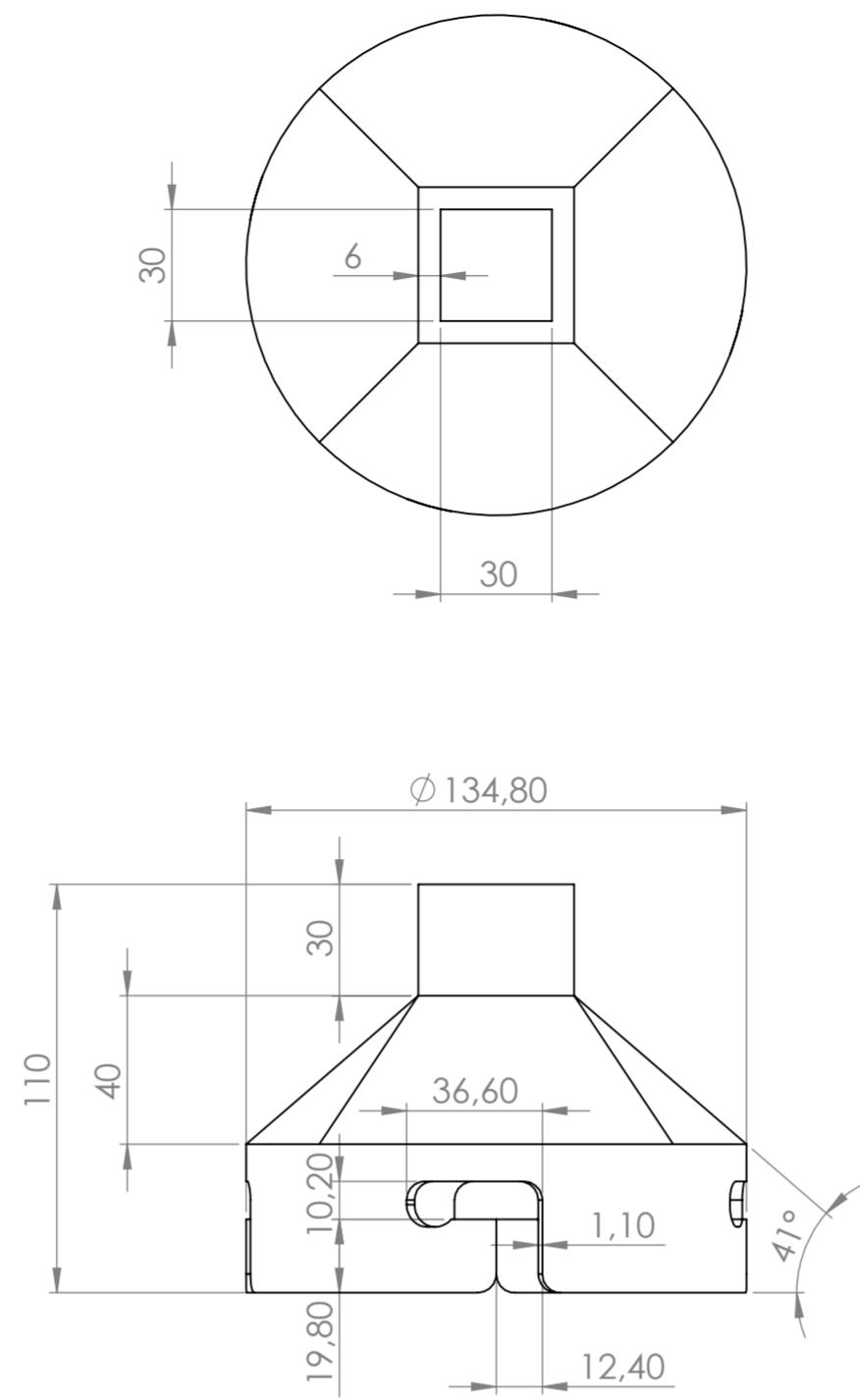
SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS

TÍTULO:	Plano de cortes de tubo PVC subsistema "Extrusor"
N.º DE DIBUJO	5-C
ESCALA:1:2	A2

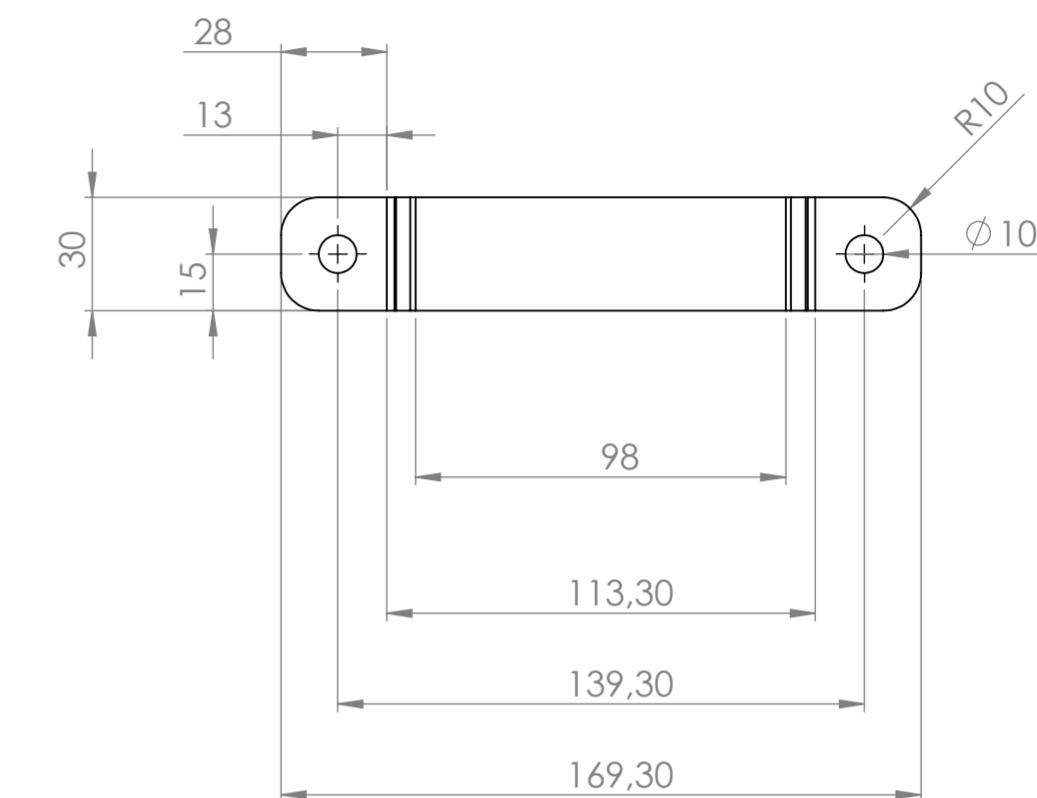
SOPORTE RADIAL SUPERIOR



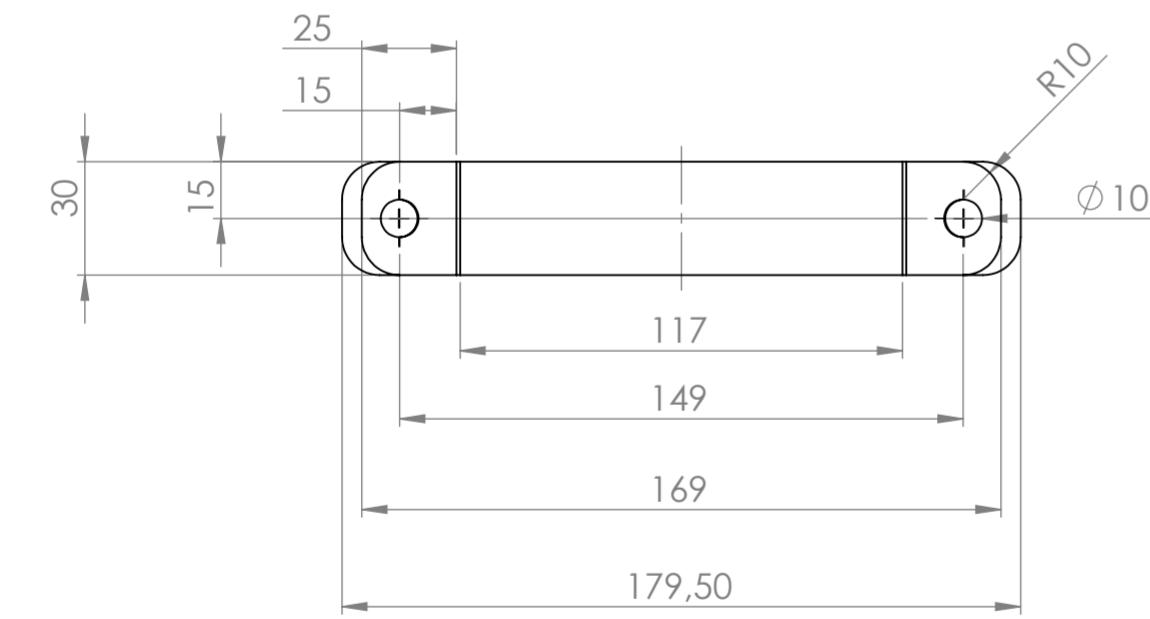
BOQUILLA



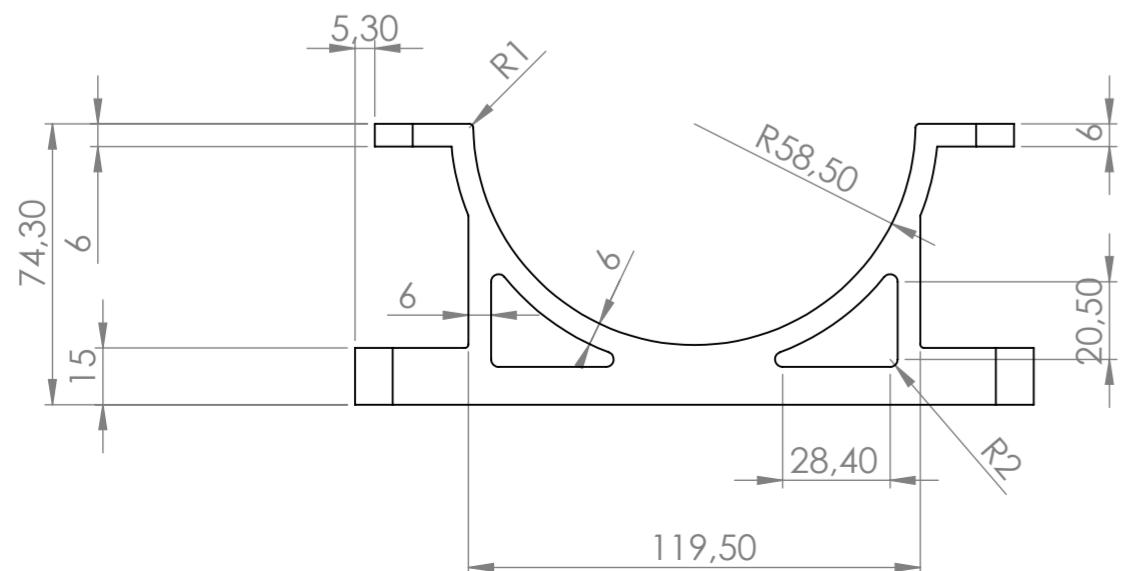
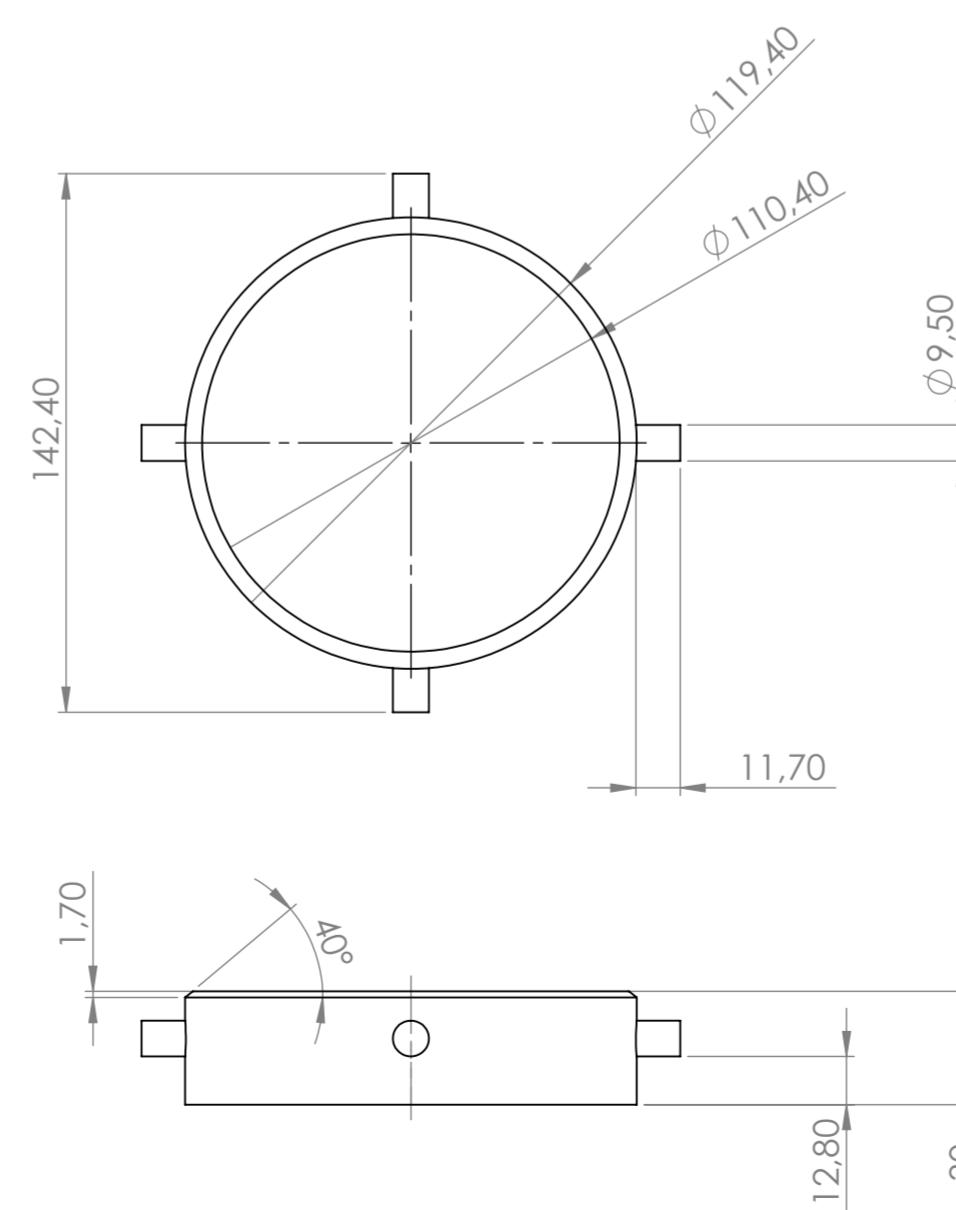
SOPORTE FIJO



SOPORTE RADIAL INFERIOR



PORTA BOQUILLA

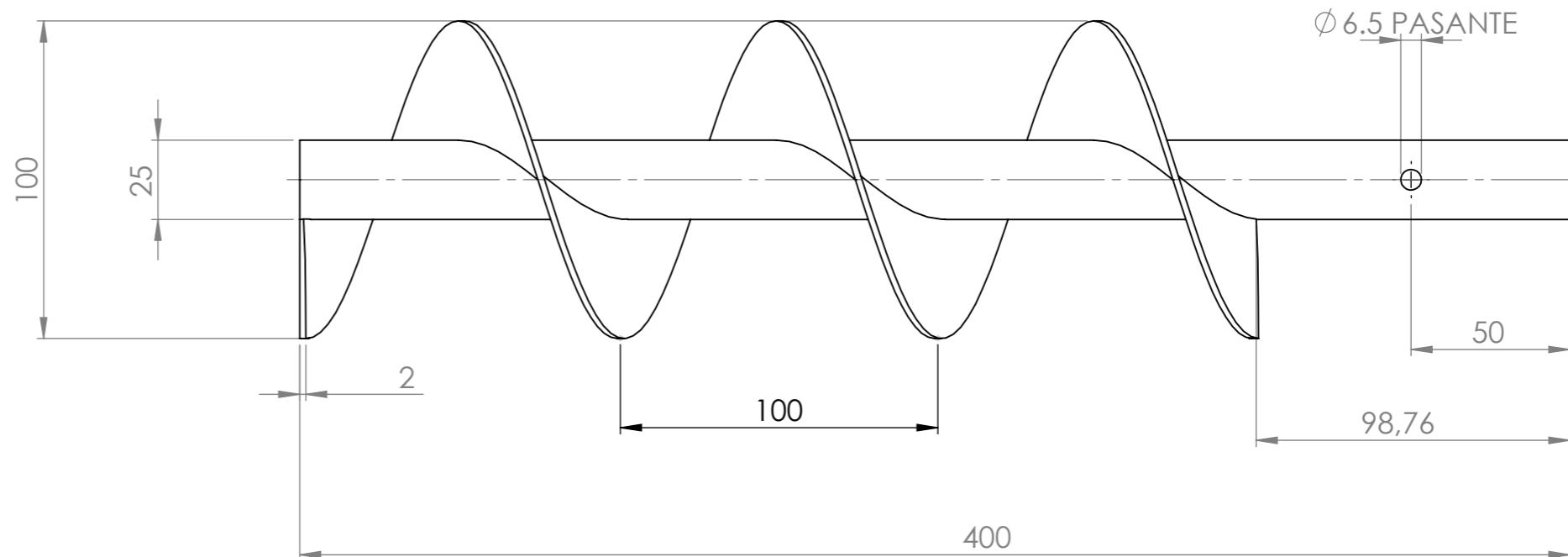
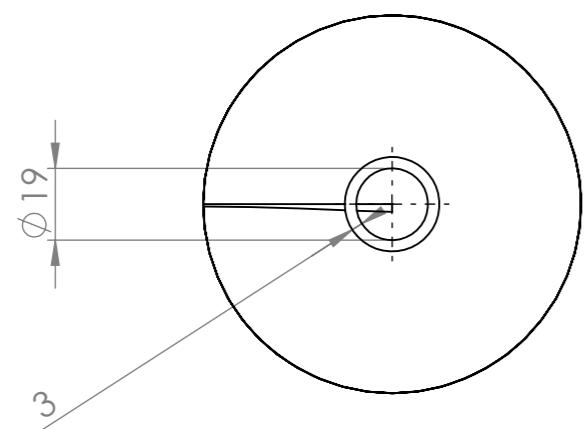


Departamento de Ingeniería Mecánica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile				PLANO:	TÍTULO:
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	REVISIÓN	Plano de partes impresas en PLA subsistema "Extrusor"
VERIF.	CS	JL			
APROB.	JL				SI NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS
FABR.					PESO:
CALID.					ESCALA:1:2
					HOJA 1 DE 1

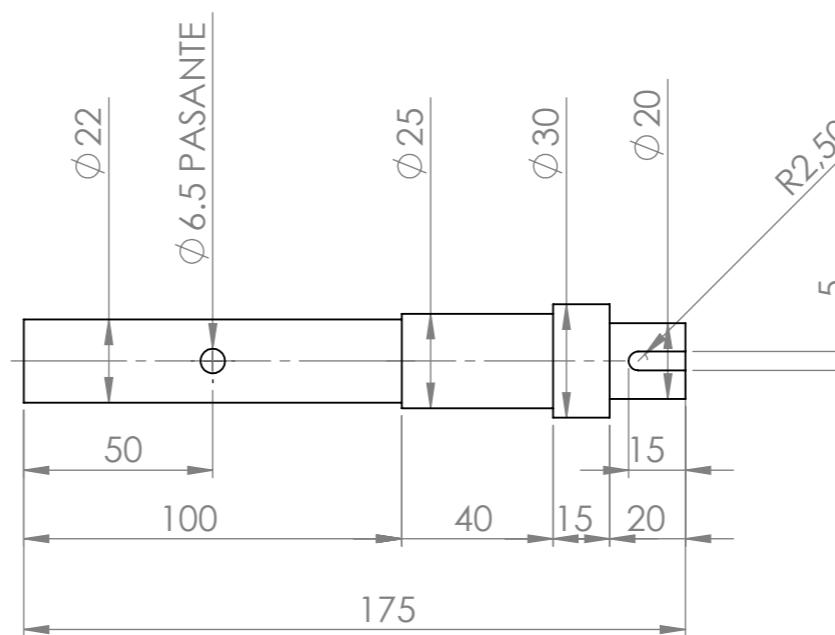
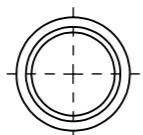
5-D

A2

TORNILLO DE EXTRUSIÓN

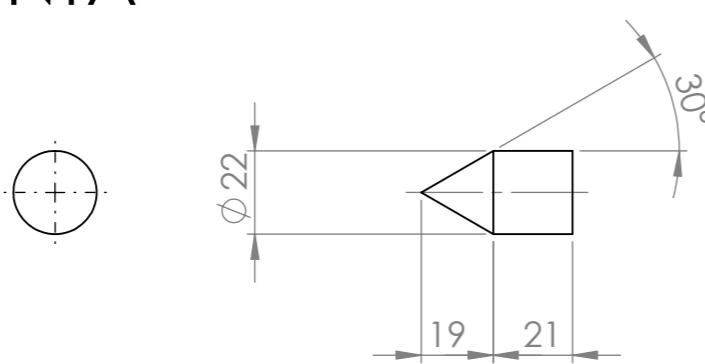


EJE DE ACOPLAMIENTO



NOTA: LA PUNTA VIENE SOLDADA AL TORNILLO DE EXTRUSIÓN. A SU VEZ, EL TORNILLO DE EXTRUSIÓN ES UNA ADAPTACIÓN A PARTIR DE UN BARRENO AHOYADOR DE TIERRA, CUYO DIÁMETRO NOMINAL ES DE 110MM

PUNTA



Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	NO CAMBIE LA ESCALA	PLANO:	TÍTULO:
DIBUJ.	CS					Plano de piezas Barreno, subsistema "Extrusor"
VERIF.	JL					
APROB.	JL					
FABR.						
CALID.						
				SÍ NO SE ESPECIFICA LO CONTRARIO, TODAS LAS COTAS ESTAN EN MILÍMETROS		
				PESO:		
					ESCALA: 1:2	
						HOJA 1 DE 1

5-E

A3